



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA EN KWAJALEIN (ISLAS MARSHALL)

Trabajo realizado por:

Manuel Zornoza Aguado

Dirigido:

Fernando J. Méndez Incera

Ana C. Rueda Zamora

Sara Ortega Van Vloten

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, Septiembre de 2020

TRABAJO FINAL DE MASTER

Riesgo de inundación costera en Kwajalein (Islas Marshall)

Trabajo de Fin de Máster

Manuel Zornoza Aguado

Directores: Fernando J. Méndez Incera
Ana C. Rueda Zamora
Sara Ortega Van Vloten

Septiembre de 2020



¿Por qué habrán hecho pájaros tan delicados y tan finos como esas golondrinas de mar cuando el océano es capaz de tanta crueldad? El mar es dulce y hermoso. Pero puede ser cruel, y se encoleriza tan súbitamente, y esos pájaros que vuelan, picando y cazando con sus tristes vocecillas son demasiado delicados para la mar.

Decía siempre la mar. Así es como le dicen en español cuando la quieren.

Ernest Hemingway, *El viejo y el mar*.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a todo aquel que ha enriquecido, de una forma u otra, mi experiencia durante este último año, tan especial en todos los sentidos.

En primer lugar, a mi familia, por su apoyo y cariño incondicional.

También, a mis amigos, tanto a *los de siempre*, con los que se puede contar sin fallo, como a los que he podido hacer durante este último año gracias al Máster, y que sin duda han hecho más ameno este trayecto.

Por último, a todo el profesorado del Máster de Costas y Puertos, por su gran profesionalidad y calidad docente. Mención especial para Fer, por la oportunidad que me ha dado y todas y cada una de sus enseñanzas, así como a todos los integrantes del grupo Surf and Surge de la Universidad de Cantabria, destacando a Ana y a Sara por su dedicación y gran ayuda.

Muchas gracias.

Resumen

Riesgo de inundación costera en Kwajalein (Islas Marshall)

Manuel Zornoza Aguado

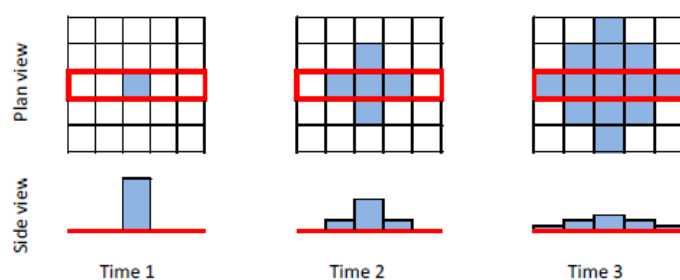
Directores: Fernando J. Méndez Incera, Ana C. Rueda Zamora, Sara Ortega Van Vloten

Septiembre 2020

Los atolones coralinos y las islas con cotas bajas del Océano Pacífico están sometidas a inundaciones de forma bastante usual, por lo que son altamente vulnerables frente a los efectos del aumento del nivel del mar debido al cambio climático. Además, otro fenómeno que afecta frecuentemente a las poblaciones de estas regiones es la sequía. La combinación de ambos eventos se convierte en un verdadero problema, dado que la salinización de los escasos acuíferos dificulta enormemente el acceso a agua dulce. Para poder definir mejor esta problemática, el presente estudio cuantifica el riesgo de inundación costera en la isla de Kwajalein, en las Islas Marshall, mediante la selección de una serie de casos representativos:

- Eventos de inundación con períodos de retorno de 10, 20 y 40 años, identificando los ciclones tropicales.
- Los swells anteriores, con una sobreelevación del nivel medio del mar debida al cambio climático de 0.20 y 0.50 metros.

Para la modelización de la inundación (amenaza), se utiliza el modelo numérico LISFLOOD-FP, desarrollado por la Universidad de Bristol, UK. Se trata de un modelo de inundación basado en técnicas ráster, que incluye diversos esquemas numéricos (*solvers*) para simular la propagación de la mancha de inundación sobre la tierra firme, utilizando las ecuaciones de aguas someras simplificadas. En el caso del estudio, se utiliza un *solver* desarrollado en 2010, que considera la fricción, las pendientes y las aceleraciones locales, pero desprecia los términos de aceleración convectiva.



El análisis del riesgo se realiza mediante un doble enfoque cuantitativo-cualitativo, calculando el valor en riesgo en el primer caso y estableciendo una relación de índices en el segundo. La vulnerabilidad se cuantifica mediante el uso de funciones de daño basadas en el uso de suelo, mientras que mide mediante el uso de un índice en el enfoque cualitativo. La exposición se caracteriza a través de datos espaciales del PCRAFI (Pacific Catastrophe Risk Assessment & Financing Initiative). La combinación de vulnerabilidad, exposición y amenaza mediante técnicas GIS da como resultado el riesgo en la isla de Kwajalein.

Las principales conclusiones que se puede extraer de los resultados son:

- Las zonas con mayor riesgo de ser alcanzadas por inundación costera en Kwajalein son la costa Sur y la Este. Es recomendable la creación de políticas de adaptación, principalmente constructivas, con el fin de proteger estas zonas.
- LISFLOOD-FP es un modelo apropiado para análisis en pequeños dominios con topografías suaves, dadas sus simplificaciones, las cuales aumentan notablemente su eficiencia computacional.
- Debido al aumento del nivel del mar, los eventos estudiados pueden aumentar su frecuencia entre 3.5 y 10 veces, dependiendo del escenario escogido. Así mismo, los daños económicos aumentan entre 3 y 9 veces, en comparación con los daños con el nivel del mar actual.

Palabras clave: Inundación costera, modelado numérico, riesgo, amenaza, daño, vulnerabilidad, exposición, cambio climático, Océano Pacífico, LISFLOOD-FP, GIS.

Abstract

Coastal flooding risk on Kwajalein (Marshall Islands)

Manuel Zornoza Aguado

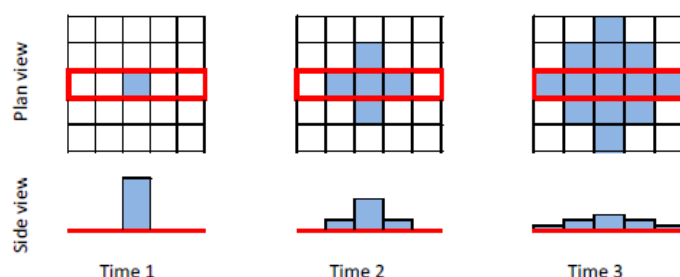
Directors: Fernando J. Méndez Incera, Ana C. Rueda Zamora, Sara Ortega Van Vloten

September 2020

Coral atolls and low-lying islands in the Pacific Ocean are subject to flooding on a fairly regular basis, making them highly vulnerable to the effects of sea-level rise due to climate change. Furthermore, another natural phenomenon that frequently affects people in these regions is drought. The combination of both events becomes a real threat, since the salinization of the scarce aquifers makes access to fresh water extremely difficult. In order to better define this problem, this study quantifies the risk of coastal flooding on Kwajalein Island in the Marshall Islands by selecting a series of representative cases:

- Flood events with 10, 20 and 40 years of return period, identifying the tropical cyclones.
- The above-mentioned swells, including a sea level rise, due to climate change, of 0.20 and 0.50 metres.

The LISFLOOD-FP numerical model, developed by the University of Bristol, UK, is used for flood modelling. This is a raster-based flood model, which includes various numerical schemes (*solvers*) to simulate the propagation of flood waves across floodplains, using simplifications of the shallow water equations. In this case, a *solver* developed in 2010 is used, which considers friction, water slopes and local accelerations, but convective acceleration is assumed to be negligible.



Risk is analyzed in both qualitative and quantitative ways, calculating the Value at Risk in the first case and establishing an index relationship in the second one. Vulnerability is quantified through the use of damage functions based on the land use, whereas it is measured with an index for its characterization. Exposure is characterized by spatial data from PCRAFI (Pacific Catastrophe Risk Assessment & Financing Initiative). The combination of vulnerability, exposure and hazard by the use of GIS techniques results in the risk on Kwajalein Island. Several conclusions can be pulled out, amongst them:

- South and East coasts are the higher threatened zones by coastal flooding in the island. Adaptation policies are strongly recommended, mainly constructive ones, in order to protect this zones.
- LISFLOOD-FP model is considered appropriate for small, smooth topography regions analysis, due to its simplifications, which notably enhance its computational efficiency.
- Due to sea level rise, the studied events could increase their frequency between 3.5 and 10 times, depending on the scenario chosen. In addition, economic damages could increase between 3 and 9 times the damages with current sea level.

Key words: Coastal flooding, numerical modelling, risk, hazard, damage, vulnerability, exposure, climate change, Pacific Ocean, LISFLOOD-FP, GIS.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CSIRO	:	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DEM	:	Digital Elevation Model
DRFI	:	Disaster Risk Financing and Insurance
EAD	:	Expected Annual Damage
GEV	:	Generalized Extreme Value
GIS	:	Geographic Information System
HyCReWW	:	Hybrid Coral Reef Wave and Water level
IPCC	:	Intergovernmental Panel on Climate Change
LIDAR	:	Laser Imaging Detection and Ranging
NCAR	:	National Center for Atmospheric Research
NOAA	:	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCRAFI	:	Pacific Catastrophe Risk Assessment & Financing Initiative
RCP	:	Representative Concentration Pathway
SERDP	:	Strategic Environmental Research and Development Program
SWAN	:	Simulating WAVes Nearshore
SWASH	:	Simulating WAVes till SHore
TWL	:	Total Water Level
UNISDR	:	UN Office for Disaster Risk Reduction
USACE	:	United States Army Corps of Engineers
USDA	:	United States Department of Agriculture
USGS	:	United States Geological Survey

Divisa: Dólar americano (\$)

ÍNDICE GENERAL

Resumen	III
Abstract	V
Acrónimos y abreviaturas	VI
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	1
1.2. Terminología	3
2. Localización y características	4
3. Motivación	8
4. Metodología	13
4.1. Preproceso	15
4.1.1. Modelo Digital de Elevaciones	15
4.1.2. Propagación oleaje	18
4.1.3. Caudales de rebase	20
4.2. Modelización de la inundación	22
4.2.1. Inputs LISFLOOD-FP	23
4.2.2. Modelo LISFLOOD-FP	27
4.2.3. Outputs LISFLOOD-FP	27
4.3. Caracterización de la exposición	28
4.3.1. Inputs para la caracterización de la exposición	28
4.3.2. Proceso de caracterización de la exposición	28
4.3.3. Outputs de la caracterización de la exposición	29
4.4. Determinación de la vulnerabilidad	29
4.4.1. Inputs para la determinación de la vulnerabilidad	29
4.4.2. Proceso de determinación de la vulnerabilidad	29
4.4.3. Outputs de la determinación de la vulnerabilidad	31
4.5. Evaluación del riesgo	31
5. Resultados	33
5.1. Amenaza	33
5.2. Vulnerabilidad	35
5.3. Exposición	36
5.4. Riesgo	37

6. Discusión	40
7. Conclusiones y recomendaciones	43
Bibliografía	45
A. Simulaciones realizadas	48
A.1. Evento sintético	49
A.2. Periodo de retorno 10 años	50
A.2.1. Serie histórica	50
A.2.2. SLR +0.2 m	51
A.2.3. SLR +0.5 m	52
A.3. Periodo de retorno 20 años	53
A.3.1. Serie histórica	53
A.3.2. SLR +0.2 m	54
A.3.3. SLR +0.5 m	55
A.4. Periodo de retorno 40 años	56
A.4.1. Serie histórica	56
A.4.2. SLR +0.2 m	57
A.4.3. SLR +0.5 m	58

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Triángulo del riesgo de Crichton (Crichton,1999)	2
1.2.	Esquema conceptual de la evaluación de riesgo (IPCC, 2014)	2
2.1.	Ubicación de las Islas Marshall (Google Earth)	4
2.2.	Zona de estudio (Holger Behr, wikipedia.org)	5
2.3.	Ortofoto del islote de Kwajalein (USDA-NRCS's Pacific Imagery Database)	5
2.4.	Construcciones en el islote de Kwajalein (Amy Clemons; SERDP Project RC-2644, Ian Robertson, University of Hawaii at Manoa)	6
2.5.	Batimetría local en el atolón de Kwajalein, con curvas de nivel cada 200 metros (NOAA)	7
2.6.	Fetch en el atolón de Kwajalein (USDA-NRCS's Pacific Imagery Database)	7
3.1.	Ejemplos de sequía en las Islas Marshall (UNDP Climate Change Adaptation)	8
3.2.	Pérdidas directas por período de retorno (PCRAFI, 2015). Nota: TC = Ciclón tropical, EQ = Terremoto	9
3.3.	<i>Expected Annual Damage</i> en Kwajalein (PCRAFI 2015)	9
3.4.	Inundaciones del 9 de octubre de 2014 (Climate Change News)	10
3.5.	Inundaciones de casi un metro de profundidad (The Times)	10
4.1.	Flujo de trabajo o metodología del proyecto (Rueda et al, 2016)	13
4.2.	Perfiles utilizados a lo largo de a costa de Kwajalein (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)	14
4.3.	DEM de Kwajalein, con las discontinuidades marcadas. 1: dique y dársenas, 2: decantadores, 3: arrecife Sur. Las cotas negativas ya han sido eliminadas.	16
4.4.	Comparación del DEM antes y después del suavizado de la vegetación.	17
4.5.	Detalle del suavizado de la vegetación.	17
4.6.	Cotas de los tres perímetros, divididas en los 36 tramos (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)	18
4.7.	MDA aplicado a los <i>swells offshore</i> (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)	19
4.8.	MDA aplicado a los vientos interiores en la laguna (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)	19
4.9.	Tramos a lo largo de la costa de la isla (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)	20
4.10.	Serie temporal de volúmenes totales de rebase en la isla, modelo HyCREWW	21
4.11.	Escenarios de aumento del <i>global mean sea level</i> , percentil 83 (Technical Report NOAA, 2017)	21
4.12.	Esquema de funcionamiento del modelo LISFLOOD-FP (University of Bristol)	22
4.13.	Esquema del hidrograma sintético	24
4.14.	Selección de máximos anuales aplicando una distribución GEV. Realizado con el software IH-AMEVA	24

4.15. Ejemplo de PDF y CDF de una variable con distribución normal (modificado de Chang, Y.; 2004)	25
4.16. Función de probabilidad acumulada (Gumbel de Máximos) de los volúmenes de rebase totales instantáneos en Kwajalein.	26
4.17. Serie temporal de volúmenes totales de rebase en la isla, obtenida con el modelo HyCREWW, con los ciclones tropicales marcados	26
4.18. <i>Shapefile</i> generado a partir de datos del PCRAFI para la determinación de la vulnerabilidad.	30
4.19. Curva de daño tipo, empleando la función beta.	30
5.1. Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.	33
5.2. Mapas de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Amenaza.	34
5.3. Curvas de daño empleadas.	35
5.4. Mapa de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Vulnerabilidad	36
5.5. Mapa de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Exposición	36
5.6. Mapas de riesgo del enfoque cualitativo.	37
5.7. Mapas de riesgo cuantitativo, medido según el daño relativo en cada celda.	39
7.1. Comparación de los ajustes Gumbel de Máximos Anuales para los tres escenarios de nivel del mar.	44
A.1. Hidrograma sintético.	49
A.2. Inundación obtenida con el hidrograma sintético constante en todos los perfiles.	49
A.3. Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno.	50
A.4. Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno.	50
A.5. Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.	51
A.6. Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.	51
A.7. Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.	52
A.8. Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.	52
A.9. Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno.	53
A.10. Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno.	53
A.11. Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.	54
A.12. Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.	54
A.13. Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.	55
A.14. Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.	55
A.15. Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno.	56
A.16. Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno.	56
A.17. Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.	57
A.18. Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.	57

A.19. Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.	58
A.20. Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.	58

ÍNDICE DE TABLAS

3.1.	Cantidad de fondos <i>ex-ante</i> disponibles para respuesta inmediata (The World Bank,2015)	11
3.2.	Marco para la Gestión del Riesgo del Banco Mundial (The World Bank)	12
4.1.	Índices color-numéricos de amenaza según cota de agua.	28
4.2.	Índices color-numéricos de exposición según cota de terreno.	29
4.3.	Índices color-numéricos de vulnerabilidad según uso de suelo.	30
4.4.	Índices color-numéricos de vulnerabilidad según uso de suelo.	32
5.1.	Value at Risk de cada evento simulado (\$). NOTA: Los valores económicos de cada uso de suelo están basados en los datos extraídos del PCRAFI.	38
7.1.	Variaciones de los períodos de retorno (años).	43
7.2.	Aumento de los daños económicos por aumento del nivel del mar, medido como el cociente entre el daño del escenario en cuestión y el escenario con nivel del mar actual.	44
A.1.	Simulaciones realizadas	48

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es la cuantificación del riesgo por inundación costera en el islote de Kwajalein, ubicado en el atolón con el mismo nombre de las Islas Marshall. Para ello, se analizará la distribución espacial de la amenaza mediante el modelado numérico de la inundación costera, obtenida a partir de series históricas de eventos climáticos, así como la exposición a lo largo del islote obtenida a partir de datos geoespaciales.

El desarrollo del documento, incluyendo este apartado, seguirá la siguiente estructura:

1. Introducción, incluyendo la situación actual en los estudios de riesgo y la definición de la terminología que se seguirá en el estudio
2. Localización y características más relevantes de la zona de estudio
3. Motivación económica y humana del estudio
4. Metodología seguida, incluyendo una descripción del modelo numérico de inundación utilizado
5. Resultados obtenidos
6. Discusión de las herramientas empleadas y de la metodología aplicada
7. Conclusiones

1.1. ESTADO DEL ARTE

El estudio del riesgo, a través de la definición de todas las variables implicadas y las relaciones existentes entre ellas, es una ciencia relativamente joven. Es por esto que existen diversos enfoques, los cuales se adaptan en mayor o menor medida a nuestros requisitos en función de sus características, con sus beneficios y desventajas. Por lo tanto, no se puede hablar de una metodología universal y perfecta, siendo necesario el desarrollo de una específica para cada estudio; si bien es cierto que la composición de esta metodología puede basarse en otras anteriores, surgiendo como la suma, convenientemente organizada, de las componentes de otros procedimientos.

La representación más sencilla (pero no por ello más simple) del estudio del riesgo es la realizada por David Crichton en 1999, a través de su triángulo del riesgo (Figura 1.1). En esta representación, se considera que el riesgo está compuesto por tres variables: exposición, vulnerabilidad y peligrosidad o amenaza. De esta forma, cuanto mayor sea el área del triángulo mayor será el riesgo, siendo la longitud de los lados proporcional a la magnitud de la variable en cuestión.

Este esquema, cuyo uso está bastante extendido por su sencillez y su carácter visual, resume el concepto del riesgo como la composición de otros términos, que a su vez están internamente formados por la confluencia espacio-temporal de características de diversa índole (físicas, sociales, económicas, ambientales, etc.). Esto último, sin embargo, no tiene una representación clara y directa en el esquema, dejando un aspecto un tanto determinista que puede dar lugar a equívocos. Sin embargo, la mayoría de los estudios de riesgo suelen fundamentar frecuentemente su base teórica en esta idea, ampliando o reduciendo su dominio a necesidad.



Figura 1.1: Triángulo del riesgo de Crichton (Crichton,1999)

Entre finales del siglo XX y principios del siglo XXI, a medida que se comenzó a estudiar en profundidad el cambio climático, surgió la necesidad de introducir esa modificación de las variables climáticas en los estudios de riesgo. A raíz de esta concienciación, en 1988 se fundó el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, [8]), una organización intergubernamental de Naciones Unidas con funciones de asesoramiento científico relacionado con el cambio climático. Esta organización describe el riesgo como una conjunción de relaciones y sinergias entre las variables de carácter social, económico o medioambiental, y el clima (Figura 1.2). La relación entre los procesos socioeconómicos y la variabilidad climática es estrecha, siendo muy sensible a las estrategias adoptadas por los países para las próximas décadas, tanto en ámbitos económicos, como políticos y sociales. Así, variaciones en comportamientos humanos pueden derivar en variaciones climáticas (positivas o negativas) de diferente magnitud, así como aumentar la exposición y la vulnerabilidad, creando alteraciones, generalmente no lineales, del riesgo.

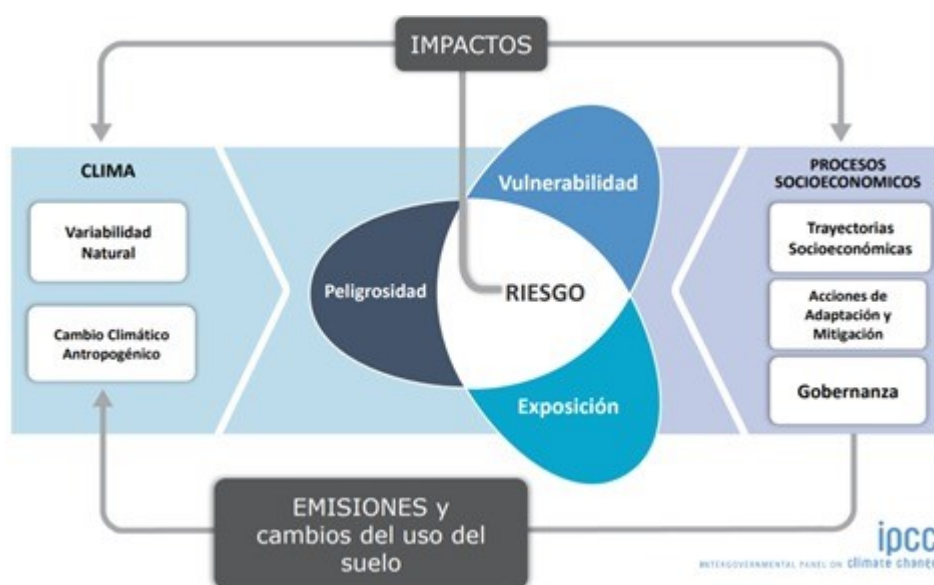


Figura 1.2: Esquema conceptual de la evaluación de riesgo (IPCC, 2014)

Por otra parte, el análisis del riesgo puede tener diversos enfoques, principalmente derivados de los términos de vulnerabilidad y exposición, pudiendo otorgar más relevancia a un aspecto que a otros. Así, suelen ser frecuentes los estudios de riesgo en términos económicos, mediante el uso de variables como el *Expected Annual Damage* (EAD). Sin embargo, pueden realizarse estudios de riesgo humano, priorizando los sectores de población más vulnerables o los más expuestos; o estudios de riesgo ambiental, en los cuales el principal elemento a analizar es el medio ambiente.

De la misma forma, desde el punto de vista estadístico, existen varias formas de abordar los estudios de riesgo. Una de ellas, la más directa, es la determinista, en la cual se asume la ocurrencia

de un evento (probabilidad igual a 1) cuyas variaciones sean casi nulas, y a partir de ello se obtiene la afección en el resto de variables implicadas en el cálculo del riesgo. Otra forma, la más completa en caso de que se trate de variables que puedan agruparse en funciones estadísticas, es mediante la consideración de la probabilidad de cada evento, variable o término implicado. Con ello, se puede calcular la probabilidad de suceso de la coexistencia (conjunción) de todas ellas, y en base a ella asignar valores (índices) de riesgo. Existe una tercera forma, consistente en la combinación de las anteriormente explicadas. Así, se mantienen ciertos términos *fijos*, es decir, aplicando el enfoque determinista, y se calculan las distribuciones estadísticas de otros, seleccionados en función de nuestro interés.

1.2. TERMINOLOGÍA

Las definiciones de los elementos asociados al riesgo es un asunto complicado desde el punto de vista del entendimiento entre las diversas partes que conforman un estudio de riesgo. Es por esto por lo que la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés), en diversos momentos, ha tratado de definirlos, con el objetivo de conseguir una terminología “universal”, o por lo menos lo más precisa posible para que pueda servir de referencia.

En este estudio, se extrae parte de esta terminología referente a los elementos del riesgo, como son la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición. Así mismo, en base a estos conceptos y al carácter de este estudio, se define el riesgo.

- **Peligrosidad** (UNISDR, 2009): condición peligrosa que puede ocasionar impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de sustento y servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **Vulnerabilidad** (UNISDR, 2017): características y circunstancias específicas de una comunidad, sistema o activo que los hace susceptibles a los efectos dañinos de amenazas. Se trata de un elemento multidimensional, ya que puede entenderse desde el punto de vista económico, ambiental, social, etc.; y dinámico, ya que está sujeto a cambios constantemente.
- **Exposición**: Ubicación relativa de una comunidad o conjunto de bienes a las posibles amenazas, en términos de nivel de afección. Por lo tanto, a partir de esta definición, se puede deducir que, en caso de exposición nula, la vulnerabilidad puede considerarse también nula, resultando por lo tanto un riesgo cero.
- **Sensibilidad**. Susceptibilidad de una comunidad frente a las posibles amenazas, generada por la incapacidad de escapar o protegerse por motivos de salud, educación o necesidades especiales; o de un bien, generada por deficiencias constructivas, estructurales o de diseño. Este término puede considerarse embebido dentro de la vulnerabilidad.
- **Riesgo**: En este estudio, el riesgo se considerará como la multiplicación de peligrosidad por vulnerabilidad, y se entiende como la posibilidad de existencia de unas determinadas consecuencias originadas por la acción de una amenaza (en este caso, el evento de inundación).

Por otra parte, es bastante común en el lenguaje hablado o en los medios de comunicación oír hablar de *desastres* o *catástrofes naturales*. Se considera que, pese a que es un concepto extendido y fácilmente entendible, si se emplea el léxico de un modo estricto y riguroso, puede dar a entender que son tragedias cuya causante es la naturaleza. Sin embargo, se trata de fenómenos propios de la actividad del planeta y de sus interacciones, siendo las variables humanas (exposición, vulnerabilidad) las que generan los desastres, es decir, sólo se puede hablar de *desastres* o *catástrofes* cuando entra en juego el factor humano. Es por esto que en lo sucesivo, este estudio empleará términos como *fenómenos* o *eventos* para referirse al proceso natural que genera la amenaza, y *catástrofe* o *desastre* para las consecuencias producidas por el mismo en el entorno humano.

LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS

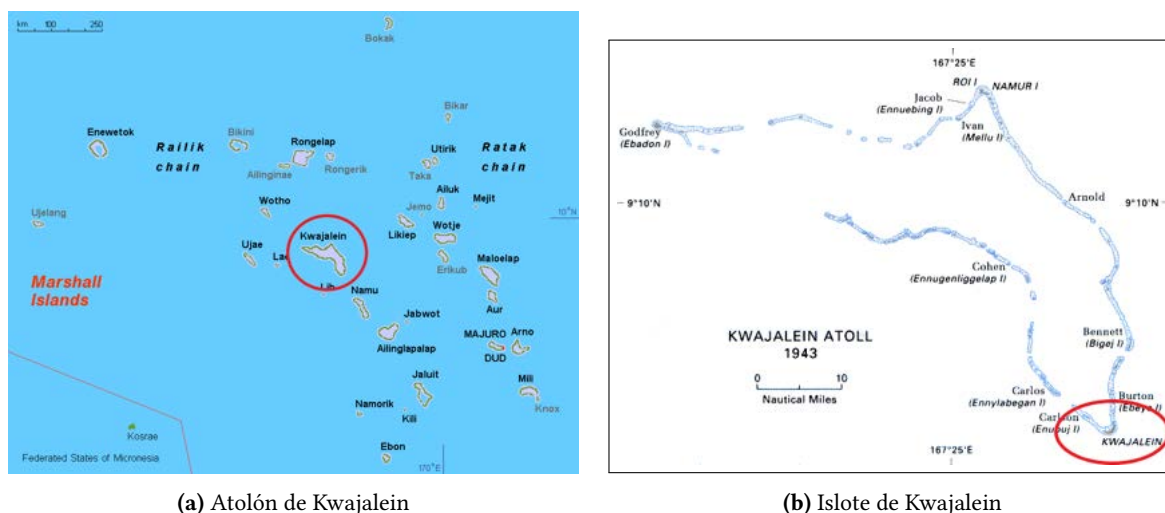
Las Islas Marshall, oficialmente República de las Islas Marshall, es un archipiélago ubicado en la región de Micronesia, dentro del Océano Pacífico. Está conformado por 29 atolones y 5 islas, que a su vez se agrupan en dos cadenas: la Cadena Ratak (*alba*) y la Cadena Ralik (*puesta de sol*). Con 370.4 kilómetros de costa, se ubican al noreste de Australia, y su capital se encuentra en el atolón de Majuro.



Figura 2.1: Ubicación de las Islas Marshall (Google Earth)

La zona de estudio se encuentra en el islote de Kwajalein, al sur del atolón con el mismo nombre. Este atolón, perteneciente a la Cadena Ralik, se encuentra en la zona central del archipiélago, y su laguna interior tiene una extensión de 2174 km², siendo una de las más grandes del mundo. Las grandes poblaciones más cercanas son Hawái y Japón, ambas a unas 2100 millas náuticas (3400 km), y Australia, a unas 2000 (3200 km) (Wyatt Olson, 2017, [11]).

Los islotes e islas del atolón, que ascienden a un número de 97, conforman una superficie total de 16.4 km², con una altura media sobre el nivel medio del mar de 1.80 metros. De entre ellas, las más destacadas por extensión y por población son Ebeye, en la zona sureste del atolón, Ebadon, en el extremo occidental, y Roi-Namur, en el extremo Norte. La gran mayoría de la población de Kwajalein, unas 15000 personas, habita la isla de Ebeye, de unas 32 hectáreas de extensión, lo que hace que tenga la mayor densidad de población del Pacífico y una de las mayores del mundo (PCRAFI, [12]).



(a) Atolón de Kwajalein

(b) Islote de Kwajalein

Figura 2.2: Zona de estudio (Holger Behr, wikipedia.org)

El islote de estudio ($8^{\circ}43'16''\text{N}$; $167^{\circ}44'0''\text{E}$) (Figura 2.3) tiene una ocupación mayoritariamente de carácter militar desde la II Guerra Mundial. Con una superficie de 2.93 km^2 y una población de unos 112 habitantes en 1999 (con permiso expreso de la US Army), se trataba de una zona con una baja densidad poblacional, en torno a $38 \text{ habitantes/km}^2$ (PCRAFI, [12]). Sin embargo, en los últimos años esa población se ha visto notablemente incrementada hasta alcanzar los 1000 habitantes, multiplicando su densidad poblacional nueve veces (Wyatt Olson, 2017, [11]; wikipedia.org).



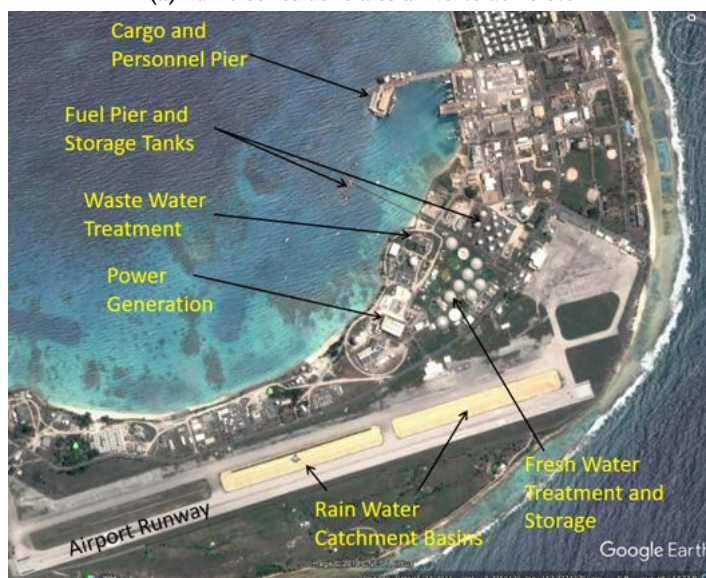
Figura 2.3: Ortofoto del islote de Kwajalein (USDA-NRCS's Pacific Imagery Database)

La mayor parte de la población de Kwajalein habita en la zona Norte de la isla (Figura 2.4 a), en construcciones habitualmente prefabricadas o de baja robustez estructural, con un máximo de dos alturas. Desde el punto de vista urbanístico, esta zona se organiza en calles perpendiculares (urbanismo ortogonal) que contienen masas de árboles, principalmente palmeras, a modo decorativo. Esto tiene especial relevancia, como se verá en el apartado 4.1: *Preproceso*.

En cuanto a infraestructuras y servicios, contiene una serie de instalaciones de alta importancia (Figura 2.4 b), la mayoría ubicadas en la zona central de la isla: una estación de depuración de aguas residuales, otra de tratamiento de agua potable, una planta de generación de energía y tanques de almacenamiento de combustible. Existen también dos diques, uno para carga y descarga de mercancías y personal, y otro para combustible. En el Sur de la isla existe un aeropuerto, en cuyas pistas existen depósitos de captación de aguas de lluvia, para su potabilización.



(a) Edificios residenciales al Norte del islote



(b) Instalaciones críticas en Kwajalein

Figura 2.4: Construcciones en el islote de Kwajalein (Amy Clemons; SERDP Project RC-2644, Ian Robertson, University of Hawaii at Manoa)

En el aspecto morfológico, cabe destacar la enorme diferencia de profundidades entre la laguna interior del atolón y el exterior, de aproximadamente un orden de magnitud (Figura 2.5). Esto es debido a su origen volcánico, ya que las Islas Marshall se ubican en el Cinturón de Fuego del Pacífico. La alta actividad volcánica de este anillo, debida a las zonas de subducción en los bordes de la placa del Pacífico, genera material volcánico a gran velocidad en términos geológicos, lo cual, genera enormes cordilleras submarinas. Aún con esta orogenia, debido a las enormes profundidades que tiene el océano Pacífico, las islas del archipiélago (y las de esta zona del Pacífico en general), tienen poca superficie emergida, principalmente debida a afloramientos coralinos. De este modo, la batimetría típica de estos archipiélagos tiene pendientes muy grandes y abruptas, no existiendo de este modo la plataforma continental.

Esta batimetría tan característica tiene gran relevancia, puesto que favorece el desplazamiento sin apenas pérdida de energía de los oleajes, generando los *swells* típicos del Pacífico, capaces de viajar miles de kilómetros desde la zona de generación hasta alcanzar costa. En el caso de Kwajalein, las principales direcciones de proveniencia, por la orientación y ubicación de la isla, son el Sur y el Este.

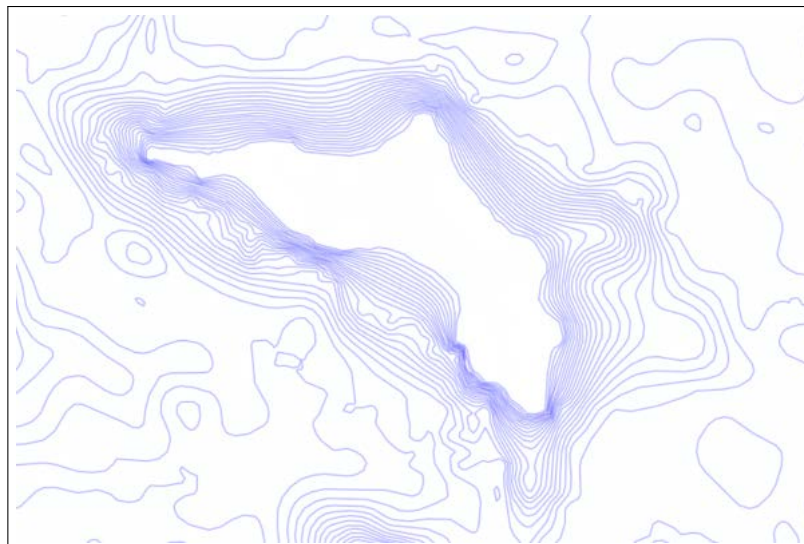


Figura 2.5: Batimetría local en el atolón de Kwajalein, con curvas de nivel cada 200 metros (NOAA)

Además, es de notoria importancia la longitud de fetch en la laguna interior, que puede llegar a alcanzar valores de hasta 80 kilómetros (Figura 2.6). Es por esto que, a la hora de caracterizar la inundación de la isla, a los *swells* dominantes provenientes del Sur y del Este, hay que sumar los *seas* generados por *storm surge* en la laguna interior, que pueden alcanzar una altura significativa de ola cercana a 2 o 3 metros (atendiendo al ábaco del Shore Protection Manual). Las cotas tan bajas que tiene la isla, y las escasas estructuras de protección en su costa oeste (la bañada por la laguna), hacen que estos *seas*, actuando en combinación con una sobreelevación del nivel del mar (por barómetro inverso, mareas vivas, u otro), puedan inundar con relativa facilidad una gran parte de la isla.

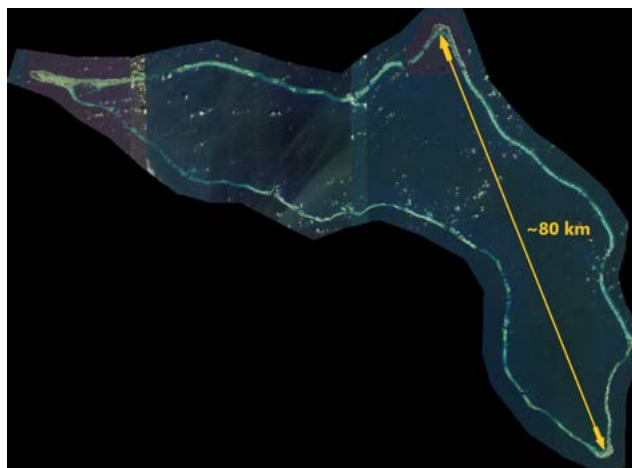


Figura 2.6: Fetch en el atolón de Kwajalein (USDA-NRCS's Pacific Imagery Database)

CAPÍTULO 3

MOTIVACIÓN

Las Islas Marshall son unas islas altamente dependientes de la agricultura, un sector muy susceptible a condiciones climáticas adversas. En los próximos 50 años, tienen un 50 % de posibilidades de experimentar pérdidas que sobrepasen los 53 millones de dólares, y un 10 % de que excedan los 160 millones (PCRAFI, [12]). El gobierno de la República tiene a su disposición 15.6 millones de dólares potencialmente disponibles para instrumentos que faciliten la respuesta *ex-ante* frente desastres naturales, lo que equivale al 44 % de su presupuesto ordinario. Se estima que hay una posibilidad del 1 % de que en cualquier año futuro, las pérdidas por desastre natural sobrepasen la cantidad total de la que se dispone.

Entre 1988 y 2018, se dieron 18 desastres naturales que afectaron a 12.700 personas, con unos costes directos estimados de 317 millones de dólares (The World Bank). La mitad de estos desastres fueron de aparición lenta, como las sequías. La principal problemática que suponen las sequías es el acceso seguro a agua, tanto potable como de saneamiento, ya que la falta de la misma supone un incremento del riesgo a contraer enfermedades transmitidas por la misma. De hecho, los eventos de 2013 (Figura 3.1) pusieron de manifiesto que las Islas Marshall no sólo eran vulnerables frente a amenazas de *storm surge*, sino que también eran extremadamente vulnerables frente a estos impactos de aparición lenta (PCRAFI, [12]). Durante estas sequías, se estima que unas 6384 personas se vieron afectadas, por la falta de agua potable y por el incremento de la salinidad en los depósitos naturales subterráneos de agua, lo que supuso la devastación de los cultivos de árbol de pan, bananas y taro. Esta situación, en caso de persistir, puede llegar a tener impactos a largo plazo en el acceso a cultivos y alimentos seguros y, por lo tanto, en la salud de las poblaciones de estos atolones.



Figura 3.1: Ejemplos de sequía en las Islas Marshall (UNDP Climate Change Adaptation)

Cabe destacar el carácter dañino para las poblaciones que tiene la sinergia entre los eventos de sequía y los de inundación costera. Esta casuística, ya sufrida por los habitantes de estas islas, agrava los problemas ya existentes de acceso a agua dulce, dado que los acuíferos se ven recargados por el agua marina que inunda su superficie. Es por esto que se considera que el archipiélago se encuentra bajo dos amenazas muy distintas, entre las cuales es complicado escoger cuál será la que más efectos

adversos pueda tener en el futuro: la sequía o el aumento del nivel del mar. Sin embargo, ambos eventos comparten como efecto negativo lo anteriormente explicado, por que se puede considerar que la inundación costera tiene incidencia en la falta de agua dulce en los atolones. La salinización de las aguas subterráneas es, por lo tanto, un efecto negativo derivado de la inundación costera, reforzando la necesidad de un estudio como el presente en las Islas Marshall.

Otros eventos naturales causantes de grandes pérdidas son los terremotos y los ciclones tropicales. Las latitudes y la ubicación geológica en que se encuentra la isla (capítulo 2: *Localización*) suponen para la misma una alta exposición a eventos naturales capaces de causar desastres. Normalmente, las pérdidas provocadas por estos fenómenos se cuantifican en millones de dólares, siendo sin lugar a dudas los más dañinos por el poco lapso de tiempo durante el cual tienen lugar y su severidad. Como se puede apreciar en la Figura 3.2, los ciclones tropicales llevan asociados unos daños de mayor magnitud, siendo unas 2-3 veces superior a los asociados a terremotos. Este hecho, junto con la frecuencia con la que suceden ciclones en estas latitudes, generan la necesidad de un estudio de riesgo que incluya los ciclones tropicales como amenaza o *hazard*.

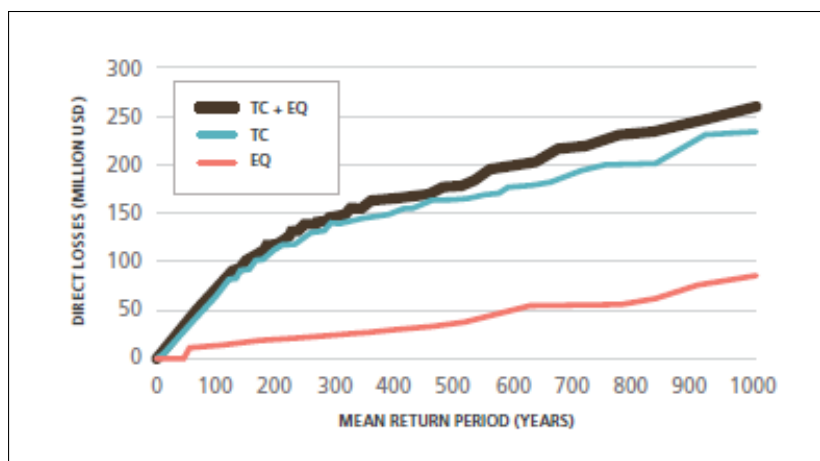


Figura 3.2: Pérdidas directas por período de retorno (PCRAFI, 2015).

Nota: TC = Ciclón tropical, EQ = Terremoto

Por ejemplo, el tifón Paka en 1997 causó unas pérdidas en los cultivos de 80 millones de dólares y afectó al 70 % de las construcciones en el atolón de Ailinglaplap (PCRAFI 2011). En los últimos 20 años, solamente los ciclones tropicales han sido causantes de unas pérdidas de 63 millones de dólares por evento (SPC-SOPAC 2012). En la Figura 3.3 se puede apreciar como Kwajalein tiene un daño anual esperado (EAD por sus siglas en inglés, *Expected Annual Damage*) realmente alto, cerca de los 2 millones de dólares. Este parámetro es un medidor del gasto medio esperable en la restauración de la actividad normal tras eventos destructivos, por lo que puede ser superado con creces o apenas sobrepasado. Su uso está muy extendido, ya que aporta una aproximación del gasto anual al que previsiblemente se va a hacer frente, pero sin embargo, si los peores escenarios del cambio climático se cumplen, este número puede quedar anticuado en pocos años.

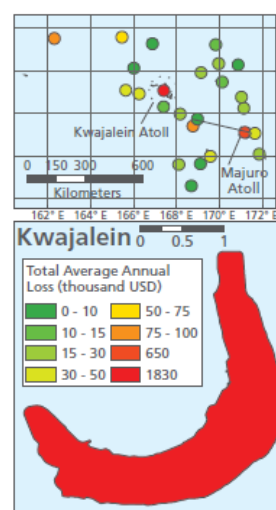


Figura 3.3: *Expected Annual Damage* en Kwajalein (PCRAFI 2015)

Sabiendo todo lo anterior, este estudio se centrará únicamente en los eventos relacionados con inundación costera, provocados tanto por ciclones tropicales, como por *swells* o variaciones del nivel medio del mar. La probabilidad de que un evento suponga un impacto significativo en las Islas Marshall se ha visto incrementado con el aumento de los niveles de población y bienes en las zonas urbanas, altamente expuestas al encontrarse a unas cotas muy bajas. En diciembre de 2008, se declaró el estado de emergencia tras semanas sometidos a niveles del mar muy altos, surgidos como combinación del *storm surge* con mareas vivas y dos depresiones tropicales (Marshall Islands Government 2009; UNOCHA 2008). Estos eventos causaron daños en infraestructuras, casas y carreteras de los atolones de Majuro y Ebeye, y se espera que eventos similares comiencen a ser cada vez más frecuentes a causa del aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.



Figura 3.4: Inundaciones del 9 de octubre de 2014 (Climate Change News)



Figura 3.5: Inundaciones de casi un metro de profundidad (The Times)

Las bajas cotas y las escasas variaciones en el relieve hacen de Kwajalein una isla altamente vulnerable a eventos de inundación costera. Además, el paso de ciclones genera un incremento en la frecuencia y la intensidad de las inundaciones, dado que estos fenómenos climáticos suelen llevar asociadas bajas presiones y precipitaciones.

Existe también otro fenómeno de carácter local y específico que ocurre en esta isla. En presencia de mareas vivas combinadas con lluvias, los sistemas de drenaje son insuficientes, ya que se ven anegados por agua marina, no pudiendo evacuar las aguas que recogen. Este fenómeno también sucede con oleajes energéticos (principalmente *swells* del exterior) cuya dirección de incidencia en costa coincide con la dirección del eje del aliviadero, no permitiendo la salida de aguas por el mismo. Ambas combinaciones de circunstancias generan inundaciones en el interior de la isla, debido a flujos inversos en los sistemas de drenaje (*reverse flows*), es decir, flujos que discurren en el sentido opuesto al de diseño de la red. Para aliviar este problema, se han instalado diversos elementos, como un emisario con una salida estrechada y doblada perpendicularmente a la dirección del conducto (*pico de pato* o *duckbill*), o deflectores en la salida de los aliviaderos para disipar la energía del oleaje, permitiendo la salida de las aguas grises.

El gasto en rehabilitación tras desastres originados por fenómenos naturales en las Islas Marshall supone un problema financiero para la República, dada su envergadura. Sin embargo, en general, el presupuesto de rehabilitación *post-desastres* está funcionando relativamente bien y emplea de manera eficiente diversas herramientas financieras, aunque el hecho de ser una economía pequeña, limita el acceso inmediato a fondos de este tipo. Aún con este condicionante, el Gobierno ha utilizado lo disponible de una forma efectiva; sin embargo, no todos los procedimientos encajan en las leyes financieras del país, especialmente aquellos relacionados con los requerimientos específicos de financiación tras un evento. En la Tabla 3.1 se observa la distribución y la organización de los fondos disponibles para la respuesta inmediata frente a desastres en 2015, en función del nivel de riesgo del evento natural generador. En el caso de estudio, las inundaciones abarcarían los tres niveles de riesgo definidos, dado que su origen puede variar desde pequeños oleajes hasta ciclones tropicales.

Nivel de riesgo	Instrumentos de financiación frente a desastres	Fondos disponibles
Riesgo alto Terremotos y ciclones tropicales grandes	Aseguradoras frente a riesgo de desastre	Cobertura de los seguros de riesgo de catástrofes (10.9 M \$)
Riesgo medio Inundaciones, pequeños terremotos	Créditos de contingencia	-
Riesgo bajo Pequeñas inundaciones, deslizamientos de tierra	Presupuesto de contingencia, reservas nacionales, presupuestos anuales	Presupuesto de contingencia (0.2 M \$) DAEF (2.8 M \$)

Tabla 3.1: Cantidad de fondos *ex-ante* disponibles para respuesta inmediata (The World Bank, 2015)

Diversos organismos han desarrollado marcos institucionales para la gestión del riesgo frente a desastres y adaptación al cambio climático, tanto a nivel local (Marshall Islands Emergency Response Plan, 2010) como a nivel internacional (Marco de Sendai, SFA 2015-2025, [18]). Todos ellos coinciden en que una actividad clave en este escenario es el aseguramiento y la financiación frente al riesgo de desastres naturales (Disaster Risk Financing and Insurance, DRFI), por lo que la identificación de las diversas componentes del riesgo en las Islas Marshall es, sin lugar a dudas, una actividad importante y necesaria, ya que, realizada de forma precisa, asegura una distribución eficiente de los fondos. De hecho, el Marco para la Gestión del Riesgo derivado de desastres, desarrollado por el Banco Mundial, establece esta actividad como el primer pilar para una correcta preparación y protección frente a los eventos naturales causantes de estas pérdidas (ver Tabla 4.4: Marco para la Gestión del Riesgo del Banco Mundial). Es, por tanto, la actividad troncal de la que nacen todas las demás, de carácter más organizativo, político y financiero.

Dentro de esta estrategia, tanto la caracterización de las componentes del riesgo como el cálculo del mismo, juegan un papel clave en el uso óptimo y eficiente de los recursos disponibles. Conociendo las variabilidades espaciales de la vulnerabilidad y la exposición, es posible plantear escenarios de desarrollo futuro cuya principal característica sea la sostenibilidad, mediante la adaptación a los cambios climáticos o socioeconómicos que puedan darse en los próximos años. Esto hace que el presente estudio tenga un alto interés, ya que permite organizar y encaminar correctamente las acciones, y, por tanto, las inversiones enfocadas a la reducción del riesgo por inundación costera. De esta forma, las inyecciones de capital pueden centrarse en aquellas zonas más sensibles (entendiendo sensibilidad como la susceptibilidad de la isla frente a amenazas, como se explica en el apartado 1.2: *Terminología*), pudiendo dirigir sus esfuerzos hacia la preparación frente a futuros eventos potencialmente dañinos para la población de Kwajalein.

Pilar 1. Identificación del riesgo	Comprensión e identificación del riesgo de desastres a través de la capacidad de elaborar análisis y gestiones
Pilar 2. Reducción del riesgo	Evitación de nuevos riesgos y reducción de los existentes en la sociedad a través de una mayor consideración de los mismos en la inversión y en las políticas
Pilar 3. Preparación	Mejora de la capacidad de gestión de las crisis mediante el desarrollo de capacidades de predicción y gestión
Pilar 4. Protección financiera	Incremento de la resiliencia financiera de los gobiernos, sectores privados y hogares mediante estrategias de protección financieras
Pilar 5. Recuperación resiliente	Recuperación más rápida y resiliente a través de apoyo al plan de reconstrucción

Tabla 3.2: Marco para la Gestión del Riesgo del Banco Mundial (The World Bank)

Cabe destacar que las características de la isla favorecen la rápida intensificación de las amenazas de carácter climático, haciéndola susceptible a eventos de sequía, terremotos, ciclones, o a inundaciones debidas al aumento del nivel del mar. Así, una condición a la que está sometido este estudio es la proyección a corto plazo de los escenarios futuros. En el caso del aumento del nivel del mar, las variaciones necesarias para generar daños en Kwajalein son mínimas, atendiendo a los escenarios RCP planteados por el IPCC, por lo que no sería lógico realizar proyecciones para final de siglo, sino para mediados del mismo. De este modo, otra motivación de este estudio es la cercanía en el tiempo de los potenciales daños.

METODOLOGÍA

Este estudio se engloba dentro del proyecto DOD/SERDP RC-2644, del Grupo de Geomática e Ingeniería Oceanográfica del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y el Medioambiente, de la Universidad de Cantabria. La idea troncal de la metodología del proyecto se asemeja a la planteada en Rueda et al, 2016 [13], con ciertas modificaciones. Consultando la Figura 4.1, la metodología explicada en el presente estudio se desarrolla a partir del cálculo de las tasas de rebase (*overtopping rates*), aunque en el apartado 4.1: *Preproceso* se describirán brevemente las acciones anteriores, que no forman parte del trabajo realizado en el presente estudio.

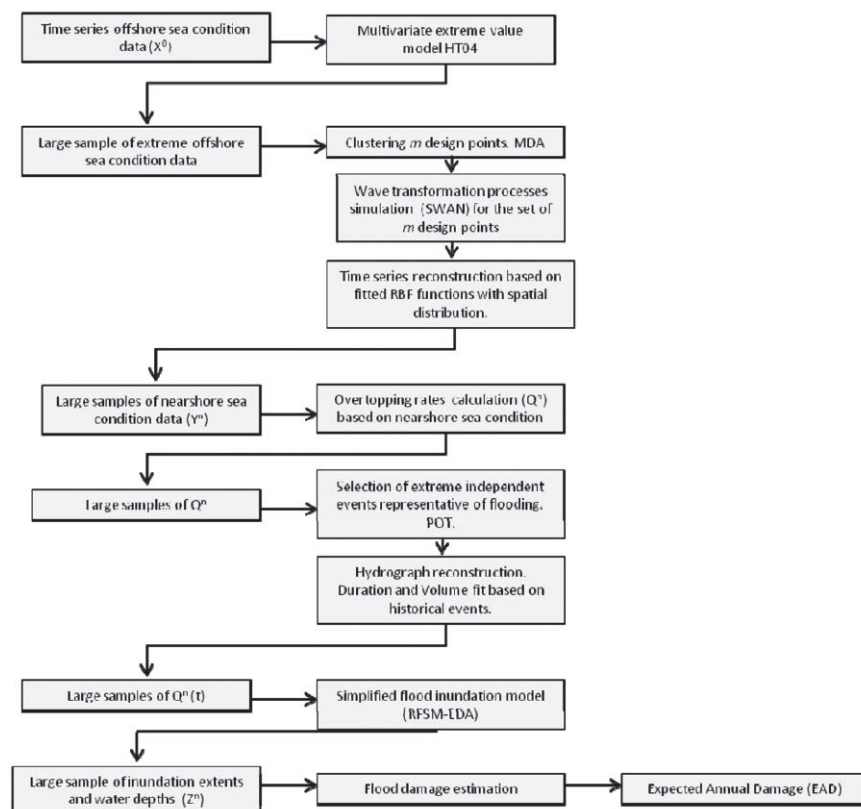


Figura 4.1: Flujo de trabajo o metodología del proyecto (Rueda et al, 2016)

La fase del proyecto en la que se encuentra este estudio es la de análisis de los eventos históricos, aunque se prevén fases futuras que contemplan la aplicación del mismo procedimiento para eventos sintéticos. La metodología del proyecto puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Obtención a partir de bases de datos met-oceánicas las variables oceánicas en profundidades indefinidas (para los swells exteriores) y de viento (para el oleaje interior).

2. Generación de 36 perfiles aproximadamente equidistantes a lo largo de la costa de Kwajalein (Figura 4.2).
3. Aplicación de algoritmos de selección MDA (Maximum Dissimilarity Algorithm) para la selección de casos de *swells* y *seas offshore*, y vientos en la laguna.
4. Propagación del oleaje obtenido a los puntos de cada perfil con profundidad $h = 10$ metros.
5. Modelización del *run-up* y de los rebases mediante el uso del modelo HyCReWW [14]. En una fase futura se empleará también el modelo híbrido HySWASH, con el fin de realizar un análisis comparativo entre ambos modelos.
6. Aplicación de los resultados obtenidos a toda la serie de datos históricos, obteniendo los caudales de rebase instantáneos.
7. Modelización de la inundación mediante el uso del modelo LISFLOOD-FP, de la Universidad de Bristol [3] [16] [19].
8. Cálculo del riesgo por inundación costera en la isla de Kwajalein, a través del uso de curva de daño.



Figura 4.2: Perfiles utilizados a lo largo de la costa de Kwajalein (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)

El trabajo de este estudio se centra en la ejecución de los dos últimos pasos de este proceso, esto es, la modelización de la inundación y la determinación del riesgo en Kwajalein. Sin embargo, se realizará una breve explicación de los procesos anteriores al presente estudio, pese a que no formen parte del mismo.

La metodología de este estudio puede subdividirse en dos formas de estudiar el riesgo: una, bajo un enfoque cuantitativo, donde se determina el riesgo cuantificando los daños económicamente; y otra, bajo un enfoque cualitativo, donde se consideran mínimas o nulas las variaciones en los elementos del riesgo, integrándolas mediante el uso de índices y se agregándolas mediante una metodología holística. Esta metodología, de carácter integrador, tiene una visión general de la situación, incluyendo y agregando variables muy diferentes entre sí mediante el uso de indicadores en su rama cualitativa, y dando valor numérico (en términos económicos) en su rama cuantitativa. Esta combinación, permite a su vez una visión sencilla y una comprensión rápida del riesgo, cumpliendo así uno de los objetivos principales de los estudios de riesgo: la claridad en los resultados.

La amenaza (eventos de inundación) se agrega con su probabilidad, siempre que es posible, con los datos de eventos históricos disponibles. Los eventos simulados son los siguientes:

- Eventos de inundación con períodos de retorno de 10, 20, 30 y 40 años, identificando los ciclones tropicales.
- Los *swells* anteriores, con una sobre elevación del nivel medio del mar debida al cambio climático de 0.20 y 0.50 metros.

Para ello, se emplea el volumen total instantáneo entrante en la isla como variable, seleccionando una sub-serie de datos mediante una distribución GEV los máximos anuales, y ajustando estos a una función Gumbel de Máximos Anuales. Una vez obtenida esta función, y conociendo la probabilidad de cada evento, se obtiene el volumen asociado a cada periodo de retorno, tras lo cual se escoge aquel evento histórico con el valor más cercano.

Al carecer de información fiable acerca de los habitantes de Kwajalein y de su distribución en grupos (edad, sexo, ocupación...), el estudio se centrará en la cuantificación de los términos del riesgo asociados a los bienes materiales (edificios, infraestructuras, y construcciones críticas). Para ello, se utilizarán datos espaciales extraídos del *Country Note. Marshall Islands*, del PCRAFI [12].

4.1. PREPROCESO

El mayor condicionante del procedimiento general de esta metodología es el modelo numérico de inundación LISFLOOD-FP. Esto se debe principalmente a:

- Su marcado carácter fluvial. Se trata de un modelo orientado a inundación fluvial, por lo que se asume un cauce por el cual discurre el agua y cuyo exterior es totalmente inundable. En el caso de estudio, al ser una isla, el proceso es similar pero con una diferencia: existe una gran masa de agua que inunda una pequeña porción del dominio.
- Su dependencia de un Modelo Digital de Elevaciones preciso. Durante la fase de pruebas iniciales, se han encontrado inestabilidades numéricas al emplear un DEM con baja resolución vertical.
- La necesaria caracterización precisa de caudales en espacio y tiempo, así como su magnitud.

Estos requerimientos generan la necesidad de realizar un preproceso a los datos de partida, el cual es único para cada estudio. Las intervenciones se han concretado a través de un proceso de *prueba y error*, donde se comprueban las inexactitudes de los resultados para conocer las fuente de error, corrigiéndolas mediante lo explicado en el apartado 4.1.1: *Modelo Digital de Elevaciones*.

Además, en este apartado de preproceso, se incluyen los procedimientos anteriores a la modelización de la inundación, necesarios para obtener los datos de partida de los que depende. Al no formar parte de este estudio, pero ser de gran relevancia para el desarrollo del mismo y encontrarse dentro del mismo proyecto, se ha considerado correcto incluirlo y explicar brevemente el desarrollo de los mismos.

4.1.1. Modelo Digital de Elevaciones

Inicialmente, el Modelo Digital de Elevaciones de Kwajalein utilizado fue una unión de la pseudobatimetría de Deltares y una topografía LIDAR del USACE, con resolución horizontal de 10 x 10 metros. Al tener una resolución vertical de 1 metro, generaba una serie de discontinuidades numéricas, por lo que se optó por utilizar otro DEM aportado por la NOAA de iguales características, pero con una mayor resolución vertical (milímetros) y georreferenciado al geoide EGM2008, siendo el cero el nivel medio del mar local. Las discontinuidades desaparecieron, pudiendo continuar así con el preproceso.

El primer paso de este preproceso es el cambio del sistema de coordenadas de geográficas (latitud-longitud) a proyectadas (Universal Transversal de Mercator, UTM). Esta transformación es debida a que el modelo LISFLOOD-FP trabaja desde sus inicios con el sistema UTM, siendo el de coordenadas geográficas de reciente desarrollo y, por tanto, más inestable.

El siguiente paso es la eliminación de discontinuidades en el Modelo Digital de Elevaciones. La eliminación de las cotas negativas (batimetría) se realiza de forma bastante directa. Tras esto, se eliminan dos espacios vacíos en el DEM, debidos a un error en la toma de datos, ya que se le

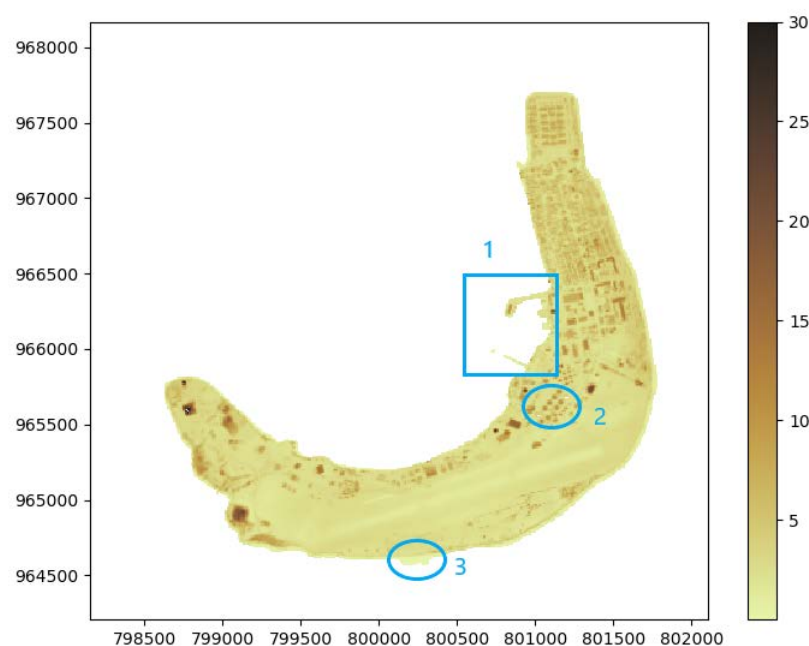


Figura 4.3: DEM de Kwajalein, con las discontinuidades marcadas. 1: dique y dársenas, 2: decantadores, 3: arrecife Sur. Las cotas negativas ya han sido eliminadas.

otorga una cota negativa a la superficie de dos decantadores de la estación depuradora de aguas residuales. Otras manipulaciones son la eliminación de los diques y dársenas situados en la zona central de la costa interior de la isla. Al modelar la inundación, como se verá en el apartado 4.2.2: *Modelo LISFLOOD-FP* no se tienen en cuenta las dinámicas en el oleaje generadas por esas estructuras (*overtopping*, difracción, etc.), ya que los caudales de rebase son calculados teniendo en cuenta las cotas de la línea de costa. Además, se elimina un pequeño arrecife en el Sur de la isla, al final de la pista de aterrizaje, que era tomado como tierra firme. Esto puede ser debido a que la toma de datos se realizó en bajamar, estando emergida esta estructura coralina, asumiéndola como terreno.

Tras la limpieza de las discontinuidades, el paso siguiente es el suavizado de la superficie. Esto se realiza principalmente por dos motivos: eliminar cambios abruptos de cota en la línea de costa, que puedan generar muros ficticios que protejan de la inundación; y evitar la creación de cuencas ficticias que retengan el agua. Ambos problemas tienen un origen común: al crear el DEM, la vegetación supone un obstáculo para el láser, que la considera terreno y modela esa superficie. Sin embargo, la superficie real, el terreno, puede encontrarse varios metros por debajo, lo cual induce a errores grandes a la hora de modelar la inundación (se desprecia la superficie que puede ocupar un tronco de un árbol, sin embargo, la pérdida de una celda y sus vecinas por tener cotas muy grandes supone un error bastante grosero a la hora de generar la inundación). Además, las cotas de la playa (por debajo de 1.5 metros) se asumen como mar, ya que a la hora de modelar el *overtopping* se escoge la mayor cota de los primeros 30 metros de tierra (apartado 4.1.3: *Caudales de rebase*), además de ser un uso de suelo que no supone pérdidas (sin tener en cuenta el transporte de sedimentos).

Así, se realiza una eliminación manual de las celdas del DEM donde se encuentra vegetación alta (principalmente palmeras), de forma análoga al proceso realizado en Brown et al, 2020 [4]. Este suavizado (Figuras 4.4, 4.5) otorga a cada celda un nuevo valor en función del que ya tiene, tratando de mantener las formas del terreno lo más fidedignamente posible. De este modo, se consigue una superficie irregular basada en la original que se asemeja a lo que puede ser la superficie real en esa zona.

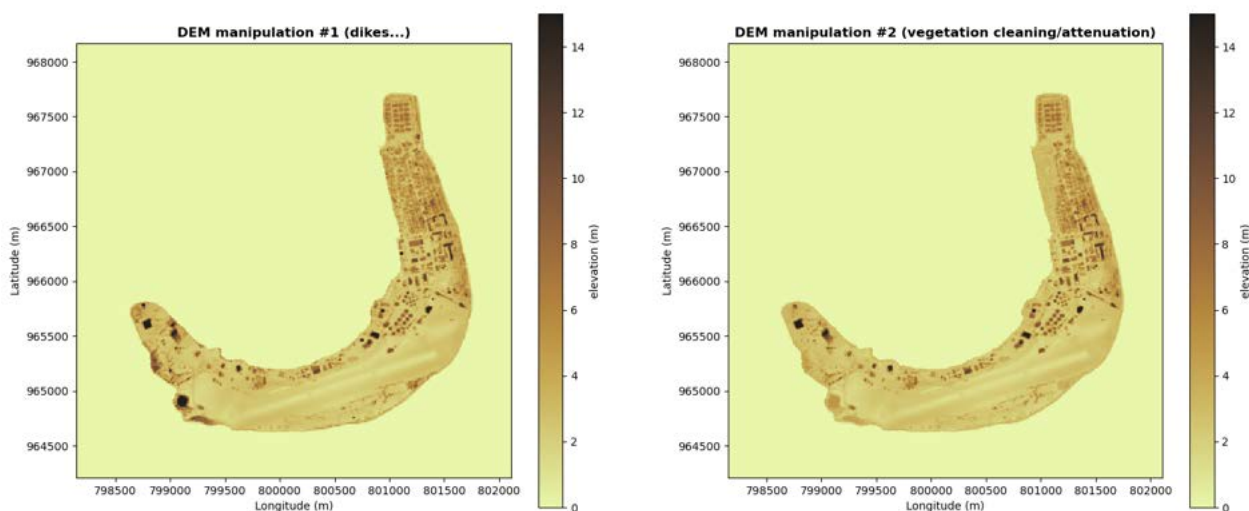


Figura 4.4: Comparación del DEM antes y después del suavizado de la vegetación.

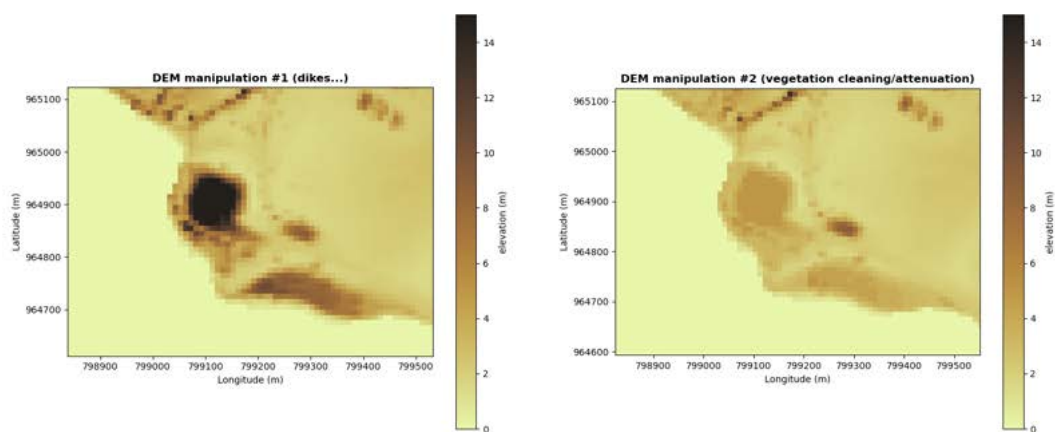


Figura 4.5: Detalle del suavizado de la vegetación.

Por último, se realiza el suavizado de la línea de costa de la isla. Para ello, se identifican las celdas que van a ser intervenidas, siendo éstas las del perímetro exterior y los dos internos a él, ya que para los modelos de rebase se analiza una distancia de 30 metros tierra adentro (al ser celdas de 10 x 10 metros, por tanto, se realizan tres perímetros). Para modelar el *overtopping*, se establecen 36 perfiles a lo largo de la costa de Kwajalein (Figura 4.6), asignando a cada punto del contorno de la isla (primer perímetro) la cota de coronación del perfil más cercano. Se asume que cada perfil representa un tramo de aproximadamente 300 metros de costa, por lo que la cota de coronación debe ser la misma en las celdas que abarque cada tramo. Para ello, se realiza la media de las cotas de esos 300 metros y se establece como la cota de coronación de ese tramo. En ciertos tramos, existen outliers que distorsionan estas cotas medias, lo cual es resuelto mediante el suavizado lineal anteriormente realizado, el cual es diferente al realizado con la vegetación, ya que tiene como objetivo la homogeneización de los puntos pertenecientes a cada tramo, asumiendo un perfil constante.

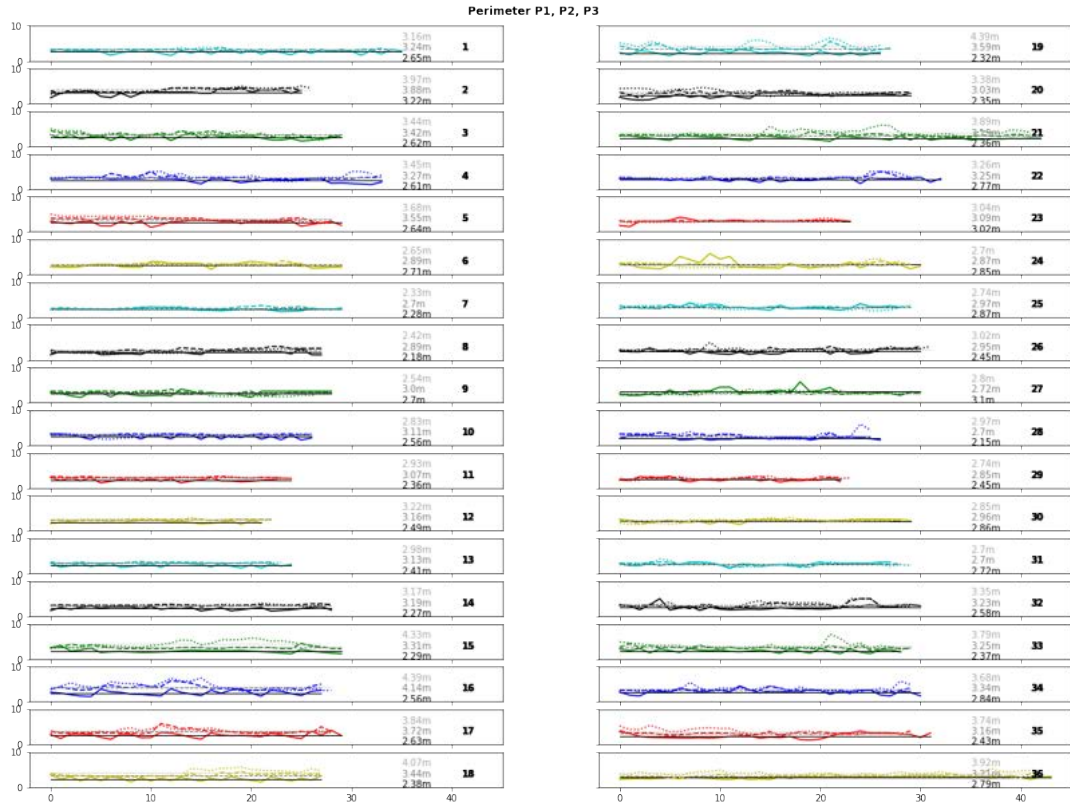


Figura 4.6: Cotas de los tres perímetros, divididas en los 36 tramos (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)

4.1.2. Propagación oleaje

Los datos de partida del oleaje son extraídos de los nodos offshore del CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). De ellos, se extraen las variables necesarias para caracterizar los estados de mar en el modelo numérico SWAN, como son la altura significativa de ola (H_s), el periodo medio (T_m), la dirección del oleaje (θ), dispersión direccional (σ) y el factor γ durante aproximadamente 40 años (desde el 01/01/1979 hasta el 16/12/2018). La selección de los eventos a simular se realiza mediante un algoritmo de selección en *clusters*, el *Maximum Dissimilarity Algorithm* o MDA (ver Camus et al, 2011 [5]). Esta *clusterización* tiene como objetivo la selección de un subgrupo de datos que sea representativo del total, y su utilidad radica en que no hace énfasis en las zonas con mayor densidad de datos, ya que basa su funcionamiento en el cálculo de la dissimilitud del dato escogido respecto al resto (cuán diferente es). El algoritmo escoge solo aquellos datos con gran dissimilitud, hasta alcanzar un grupo de datos de la dimensión N . En este caso, se formaron un total de 500 casos para *seas* (Figura 4.7) y 500 casos para *swells*, cada uno con sus variables oceánicas.

Con estas variables oceánicas en profundidades indefinidas, se propaga el oleaje a través del modelo numérico SWAN. En el caso de los *swells*, se establece una H_s de 1 metro, obteniendo así los coeficientes de propagación hasta la costa, concretamente a los puntos batimétricos de cada perfil con profundidad igual a 10 metros. Tras esto, se propaga hasta cada uno de los 36 puntos, multiplicando el valor de la H_s en el nodo *offshore* por el respectivo coeficiente. El hecho de escoger los puntos según su profundidad y no según su distancia a costa se debe a la morfología de la batimetría en los atolones del Pacífico. Debido a su orogenia volcánica (Capítulo 2: *Localización y características*), se trata de batimetrías con cambios de cota bruscos, donde no existe una plataforma continental bien definida. Esto hace que la elección de los puntos de referencia debe ser realizada cuidadosa, puesto que en cuestión de pocos metros la batimetría puede cambiar un orden de magnitud, impidiendo asumir las profundidades en las que se encuentra el oleaje.

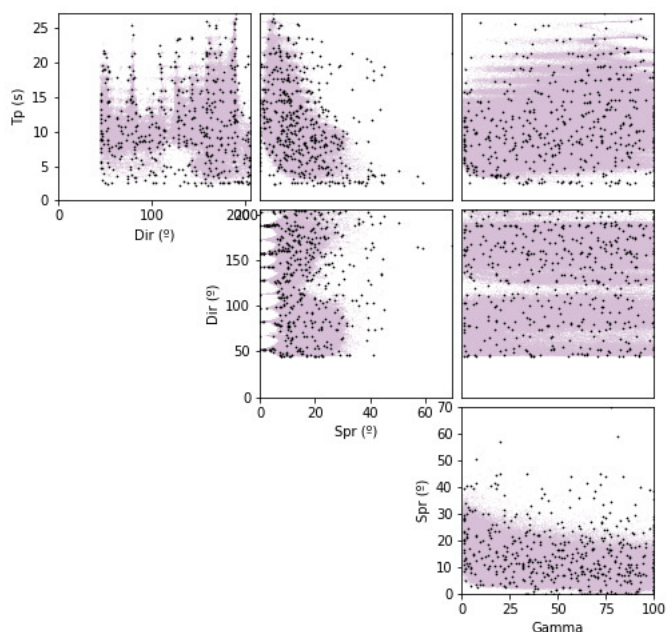


Figura 4.7: MDA aplicado a los *swells offshore* (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)

Por otro lado, el oleaje interior de la laguna del atolón recibe únicamente el forzamiento del viento, generando así mares de viento o *seas* en la costa Oeste de Kwajalein. Se establece la hipótesis de que el oleaje exterior no tiene influencia en la laguna interior, considerando así a la isla como una barrera natural que encierra el agua de forma perfecta en la laguna. En este caso, se aplica un MDA a las variables de velocidad y dirección del viento, escogiendo 100 casos (4.8).

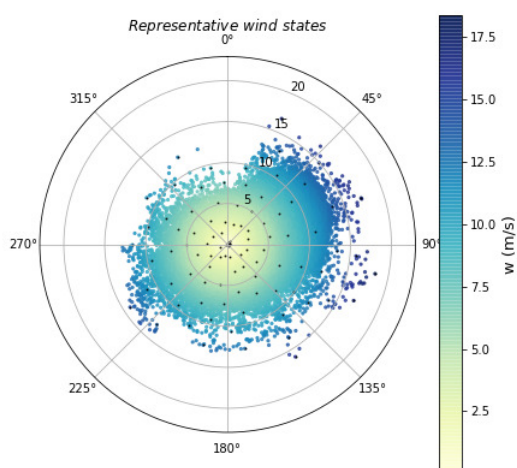


Figura 4.8: MDA aplicado a los vientos interiores en la laguna (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)

4.1.3. Caudales de rebase

Para el cálculo de los caudales de rebase, se emplea el metamodelo numérico HyCReWW (Rueda et al, 2019). Se trata de una base de datos procesada de estimaciones de *run-up* en un perfil 1D idealizado de un arrecife, la cual permite un número finito de simulaciones del modelo XBeach con diferentes configuraciones morfológicas del arrecife. El oleaje en aguas profundas y las condiciones del nivel del mar son parametrizadas basándose en Funciones de Base Radial (Radial Basis Functions, RBFs), permitiendo realizar estimaciones rápidas y precisas de *run-up* a lo largo de costas protegidas con arrecifes de coral.

Una vez conocidos los parámetros de la RBF, así como las variables de TWL , H_s y T_m , se modeliza el *run-up* y el *overtopping*. A través de las cotas de la línea de costa obtenidas en el apartado 4.1.1: *Modelo Digital de Elevaciones*, se estiman los caudales de rebase en cada perfil, y, de esta forma, en cada tramo. Estos caudales (en $L/s \cdot m$) se consideran constantes en el intervalo de tiempo de cálculo, igual a 1 hora; es decir, los hidrogramas utilizados tienen una forma escalonada. En cada instante y en cada tramo, estos valores se multiplican por la longitud del tramo correspondiente, aportando indirectamente el volumen de agua entrante en la isla en cada instante. Esto es de especial relevancia para el cálculo de los eventos extremos, como se verá en el apartado 4.2.1: *Inputs LISFLOOD-FP*. Por tanto, esta parte del preproceso está estrechamente vinculada con el suavizado del DEM, concretamente con el preproceso de la línea de costa, ya que en caso de no realizar un análisis de las discontinuidades del perímetro, los caudales de rebase podrían verse modificados notablemente.

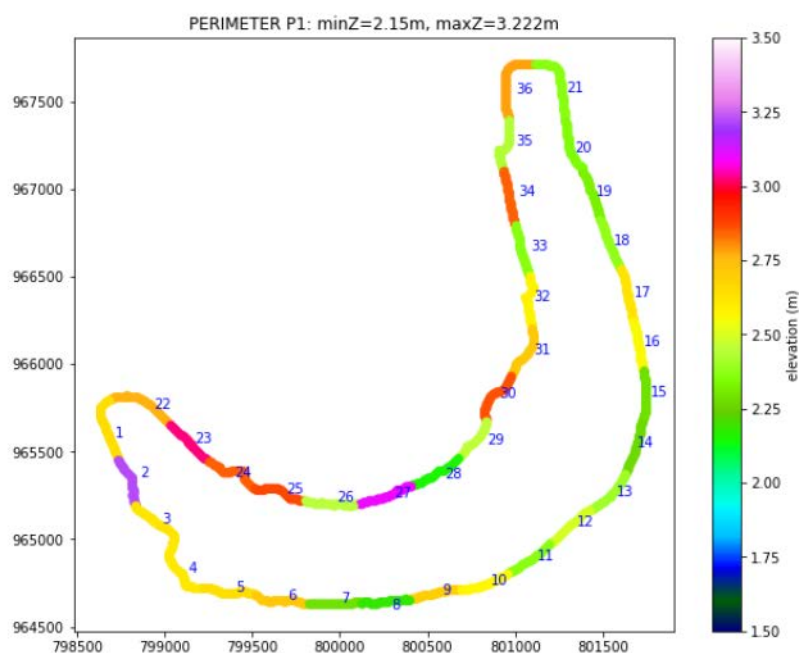


Figura 4.9: Tramos a lo largo de la costa de la isla (Grupo de Ingeniería Geomática y Oceanográfica, Universidad de Cantabria)

En fases futuras del proyecto, se realizarán, a modo de análisis de la robustez del proceso, las mismas simulaciones con el metamodelo HySWASH, basado en el conocido modelo numérico SWASH (TUDelft, 2010). Este es un modelo de flujo no hidrostático de oleaje utilizado para la predicción de las transformaciones de las olas dispersivas de la superficie desde aguas profundas hasta la costa. Principalmente se utiliza en el estudio de la propagación del oleaje, agitación portuaria y dinámicas de la zona de rompientes y de rebalaje (más comúnmente denominada por su nombre en inglés, *swash zone*). La parametrización de las condiciones de nivel del mar y de las variables oceánicas se realizan, al igual que con el HyCReWW, mediante funciones RBF.

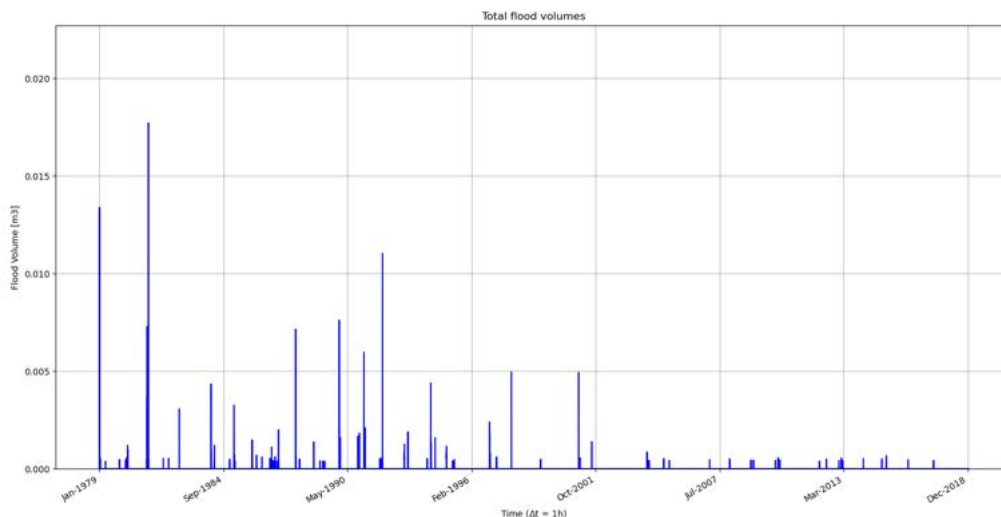


Figura 4.10: Serie temporal de volúmenes totales de rebase en la isla, modelo HyCREWW

Por otra parte, el análisis del aumento del nivel del mar debido al cambio climático se realiza mediante la modificación del nivel del mar introducido, lo cual sobreeleva las series históricas de variables oceánicas introducidas, generando rebases mayores (ver apartado 5.1: *Amenaza*). Los escenarios utilizados son escogidos de entre seis, los cuales se identifican por su aumento para el año 2100. Dentro de cada escenario, existen tres subescenarios -bajo, medio y alto- que corresponden con los percentiles 17, 50 y 83 de las proyecciones climáticas del nivel del mar. Los valores de cada escenario se obtienen como la suma del nivel del mar climático y una tendencia lineal de aumento del nivel del mar *no climática*. Dentro de estos escenarios, se escogen las proyecciones medias de 2100 de los escenarios 0.2 y 0.5, que corresponden con un aumento de 0.2 y 0.5 metros del nivel medio del mar para el año 2100.

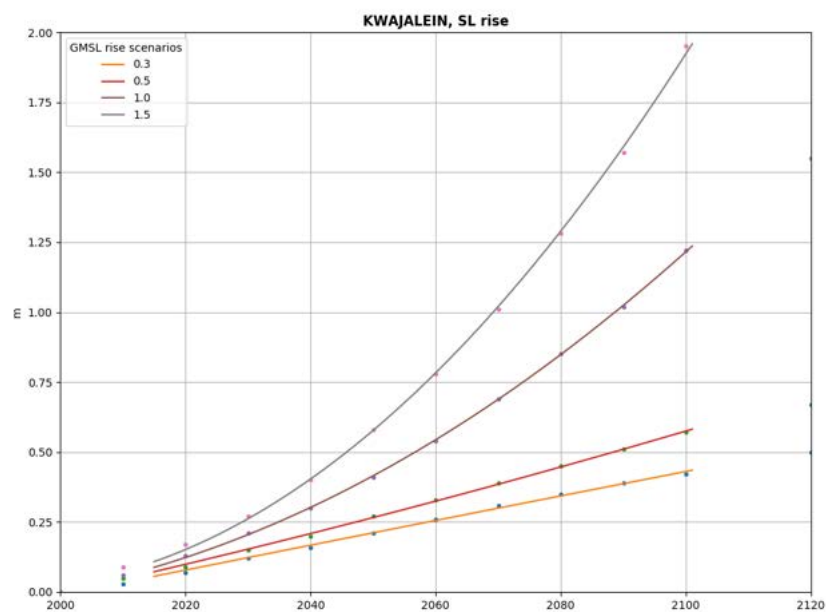


Figura 4.11: Escenarios de aumento del *global mean sea level*, percentil 83 (Technical Report NOAA, 2017)

4.2. MODELIZACIÓN DE LA INUNDACIÓN

La inundación es modelada a través del modelo numérico LISFLOOD-FP, desarrollado por la Universidad de Bristol [3] [16] [19]. Se trata de un modelo hidráulico acoplado 1D/2D de inundación basado en técnicas ráster, que incluye diversos esquemas numéricos (*solvers*) para simular la propagación de la mancha de inundación sobre la tierra firme, utilizando las *shallow water equations* simplificadas. En su forma más sencilla, el modelo recibe un Modelo Digital de Elevaciones y unos caudales (detallando su localización y sus dimensiones), y simula las dinámicas de inundación. El modelo utiliza los principios de continuidad hidráulica y de conservación de la masa para calcular la profundidad de agua en cada celda del ráster, conduciendo el agua a través del terreno usando un algoritmo simple de almacenamiento en cada celda, basado en la diferencia entre las alturas piezométricas de celdas adyacentes (ecs. 4.1, 4.2 y Figura 4.12).

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (4.1)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \left(\frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta y \quad (4.2)$$

donde $h_{i,j}$ es la altura de la superficie libre del agua en la celda (i,j), D_x y D_y son las dimensiones de la celda, n es el coeficiente de Manning, y Q_x y Q_y describen los flujos de agua entre las celdas del terreno, en las direcciones x e y del plano 2D. La profundidad del flujo, h_{flow} , representa la profundidad a través de la cual el agua puede fluir entre dos celdas, y se define como la diferencia entre la mayor altura piezométrica y la mayor elevación del terreno de las dos celdas. El modelo utiliza las unidades estándar del Sistema Internacional: metros para la longitud, segundos para el tiempo, y m^3/s para los caudales.

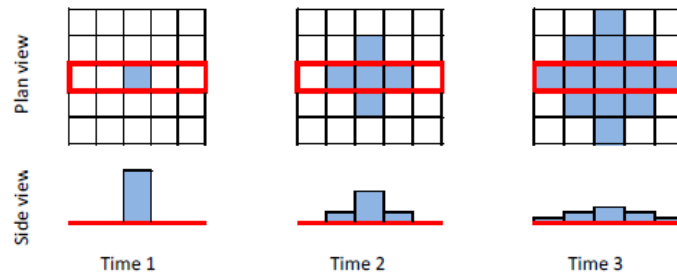


Figura 4.12: Esquema de funcionamiento del modelo LISFLOOD-FP (University of Bristol)

Existen muchos solvers para el cálculo de la cantidad de agua que fluye entre celdas; en el caso de inundación costera, el que más se adapta a las necesidades es el *acceleration model*. Se trata de una forma simplificada de las *shallow water equations* (eq. 4.3), donde se incluye un término de aceleración local considerando los términos advectivos despreciables. De esta forma, el flujo entre celdas se calcula como una función de la fricción, la pendiente y la aceleración. Esta formulación inercial (Bates et al, 2010 [2]) permite soluciones estables con pasos de tiempo más largos, y por lo tanto aumenta de manera sustancial la eficiencia computacional del modelo, en comparación con otros modelos de propagación de onda al uso.

$$\frac{\delta(\rho\eta)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\eta u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho\eta v)}{\delta y} = 0$$

$$\begin{aligned}
\frac{\delta(\rho\eta u)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\rho\eta u^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) + \frac{\delta(\rho\eta uv)}{\delta y} &= 0 \\
\frac{\delta(\rho\eta v)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\eta uv)}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} \left(\rho\eta u^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) &= 0
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

donde ρ es la densidad del agua, η es la altura total de la columna de agua (entendida como la profundidad instantánea del fluido, función de x , y , t), g es la aceleración de la gravedad y los vectores u, v son las componentes 2D de la velocidad horizontal del flujo.

Para ello, se utiliza un paso de tiempo que varía de acuerdo con la ampliamente utilizada condición de convergencia de ecuaciones diferenciales de Courant-Friedrichs-Lewy o CFL (eq. 4.4). Esta condición establece que el paso de tiempo de cálculo debe ser inferior al tiempo necesario para que la mancha de inundación alcance las celdas adyacentes. Cuando el ancho de celda se reduce, el límite superior para el intervalo de tiempo es inferior.

$$c^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \leq 1 \rightarrow CFL = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \tag{4.4}$$

donde Δt es el intervalo de tiempo, Δx es el intervalo de espacio, y c es el número de Courant.

Se puede encontrar información más detallada acerca del desarrollo de los *solvers* en 2D en De Almeida y Bates, 2013 [6] y en Bates et al, 2010 [2].

4.2.1. Inputs LISFLOOD-FP

Las unidades básicas requeridas para realizar simulaciones con el modelo de inundación LISFLOOD-FP son un Modelo Digital de Elevaciones y unos inputs de entrada de flujo, ya sea en forma de caudales o niveles, fijos o variables. Dentro de estos dos *inputs* del modelo, existen diversas características que se detallan en el presente apartado.

Respecto al DEM, se utiliza el aportado por la NOAA, preprocesado (ver apartado 4.1: *Modelo Digital de Elevaciones*), con resolución vertical de 0.001 m y ancho de celda igual a 10 metros. Las cotas están georreferenciadas al geoide EGM2008, con el cero en el nivel medio del mar local. De este archivo se extraen las coordenadas de las celdas que conforman el primer y el segundo contorno exterior de la isla, que serán utilizadas para el establecimiento de los puntos de calado fijo (HFIX) y de entrada de caudal variable en el tiempo (QVAR), respectivamente. Con estos datos, por requerimiento del modelo LISFLOOD-FP, se construyen dos ficheros en formato ASCII: uno con extensión *.dem.asc* del DEM y otro con extensión *.bci* de las condiciones de contorno, que en este caso son las coordenadas de los perímetros primero y segundo, asignando a cada punto el tramo al que pertenece mediante un código numérico del 1 al 36.

En cuanto a las entradas de flujo, se establece un nivel fijo de 1 metro a lo largo de todo el perímetro exterior, evitando así la acumulación excesiva de agua en los primeros metros de tierra (ya que al encontrarse con NaNs, el agua no fluye y se acumula en las celdas con valor numérico). En el perímetro interior, se introducen series de caudal variable durante 49 horas. Este caudal se aporta en $m^2/s \cdot m$, de forma que el modelo multiplica ese valor por el ancho de celda (10 metros), obteniendo así un valor en $m^3/s \cdot m$.

Primeramente, a modo de prueba, se introduce en todos los tramos un hidrograma triangular sintético con duración de 10 horas y un pico de caudal instantáneo de 50 L/m-s (4.13, Nota: realmente se trata de un hidrograma escalonado, pero la visualización se realiza de forma triangular).

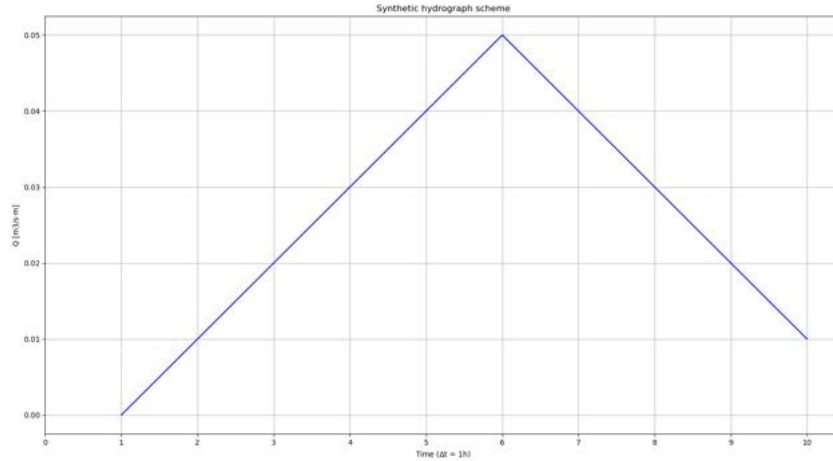


Figura 4.13: Esquema del hidrograma sintético

Para la selección de casos, se realiza un análisis extremal tomando como variable de referencia el volumen total instantáneo entrante en la isla. De esta forma, se consigue una única variable para toda la isla, ya que la variabilidad espacial de los rebases hace imposible el análisis de máximos con los caudales. Así, se obtiene una serie temporal, de unos 40 años de longitud, de volúmenes instantáneos, de los cuales se obtienen los extremos anuales mediante la aplicación de una distribución GEV (Generalized Extreme Value) de máximos anuales (Figura 4.14). Esto aporta una serie de 40 volúmenes totales máximos instantáneos, que servirán como variable para el análisis estadístico extremal de la inundación en Kwajalein.

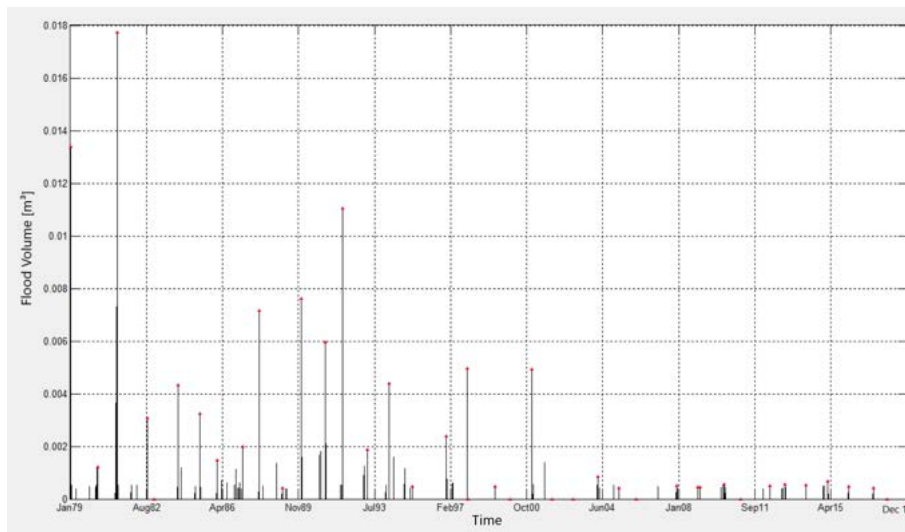


Figura 4.14: Selección de máximos anuales aplicando una distribución GEV. Realizado con el software IH-AMEVA

La probabilidad de que un evento supere un cierto caudal (Q^*) se define a través de la función de distribución de probabilidad, siendo el área bajo la curva hasta el valor Q^* de la función de distribución acumulada (ec. 4.5, Fig. 4.15). La probabilidad del evento de cálculo se calcula como la inversa del período de retorno ($P = 1/T$).

$$Prob(Q \leq Q^*) = \int_0^{Q^*} f(Q) dQ \quad (4.5)$$

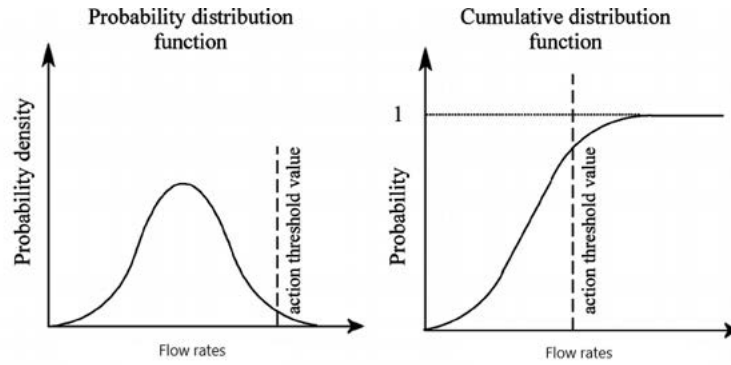


Figura 4.15: Ejemplo de PDF y CDF de una variable con distribución normal (modificado de Chang, Y.; 2004)

Al tratarse de una variable discreta de N componentes, la caracterización de cada elemento de a misma con índices i se realiza mediante fórmulas de punteo. Con el objetivo de poder representar sobre papel probabilístico las funciones, se evita la tradicional de i/n , ya que al transformar la escala se convierte en ∞ . Para ello, dentro de la fórmula de punteo $\frac{i+a}{N+b}$ se asume que a toma valor cero y b toma valor 1.

El ajuste se realiza sobre una función de distribución Gumbel de Máximos (ec. 4.6), la cual tiene dos parámetros representativos: ψ (parámetro de escala) y μ (parámetro de localización). Una vez parametrizada, esta se representa sobre un papel probabilístico, pudiendo así obtener una relación entre caudales y probabilidades de superación de los mismos de una forma cómoda y sencilla.

$$F(Q) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(Q - \mu)}{\psi}\right)\right) \quad (4.6)$$

donde

$$\psi = \frac{\sqrt{6}s_x^2}{\pi}$$

$$\mu = \bar{x} - 0,5772\psi$$

siendo \bar{x} y s_x^2 la media y la varianza, respectivamente.

El objetivo, por tanto, es la construcción de una función de distribución empírica que permita el cálculo del volumen asociado a cada período de retorno (Figura 4.16). A través de este proceso, se obtienen las probabilidades de los eventos de 10, 20, 30 y 40 años para el período de tiempo de la serie histórica. Tras esto, se obtiene, a partir de la función de densidad de probabilidad antes ajustada, los eventos más similares a aquellos con esta probabilidad.

Una vez obtenidas las fechas de estos eventos de control, se extrae el caudal de cada tramo correspondiente a las mismas, ± 24 horas; es decir, se generan eventos caracterizados por un hidrograma de 49 horas de duración, con el máximo en la hora 25.

Así mismo, de entre los eventos de rebase, se identifican los ciclones tropicales Alice (1979), Pamela (1982), Chataan (2002) y Bavi (2015) (Figura 4.17). Para la modelización completa de estos eventos de inundación, se deben incluir los volúmenes de lluvia en los mismos instantes de tiempo. Sin embargo, sólo se disponen de series de lluvia a partir del año 1998 (series extraídas de la base de datos de la NCAR, dentro de la Tropical Rainfall Measuring Mission), no coincidiendo ningún evento simulado en ese período de tiempo, por lo que es un aspecto que se debatirá en el Capítulo 6: *Discusión*. Respecto a los casos con aumento del nivel del mar, se simulan los eventos con los mismos períodos de retorno, pero añadiendo 0.20 y 0.50 metros al nivel del mar local.

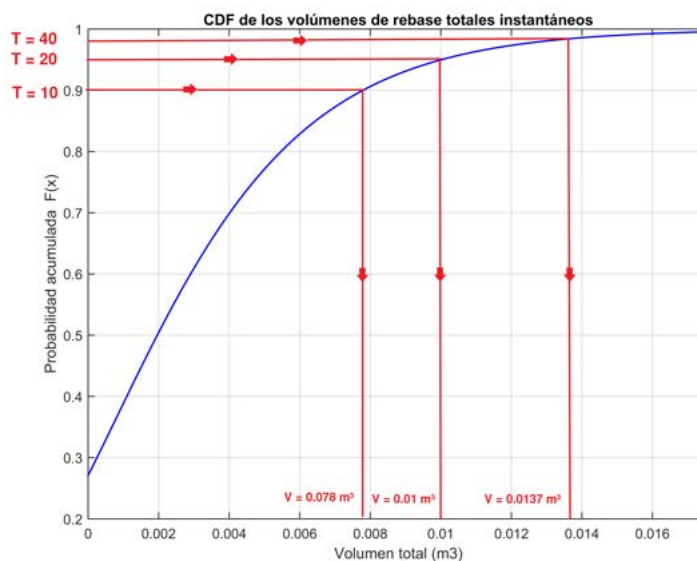


Figura 4.16: Función de probabilidad acumulada (Gumbel de Máximos) de los volúmenes de rebase totales instantáneos en Kwajalein.

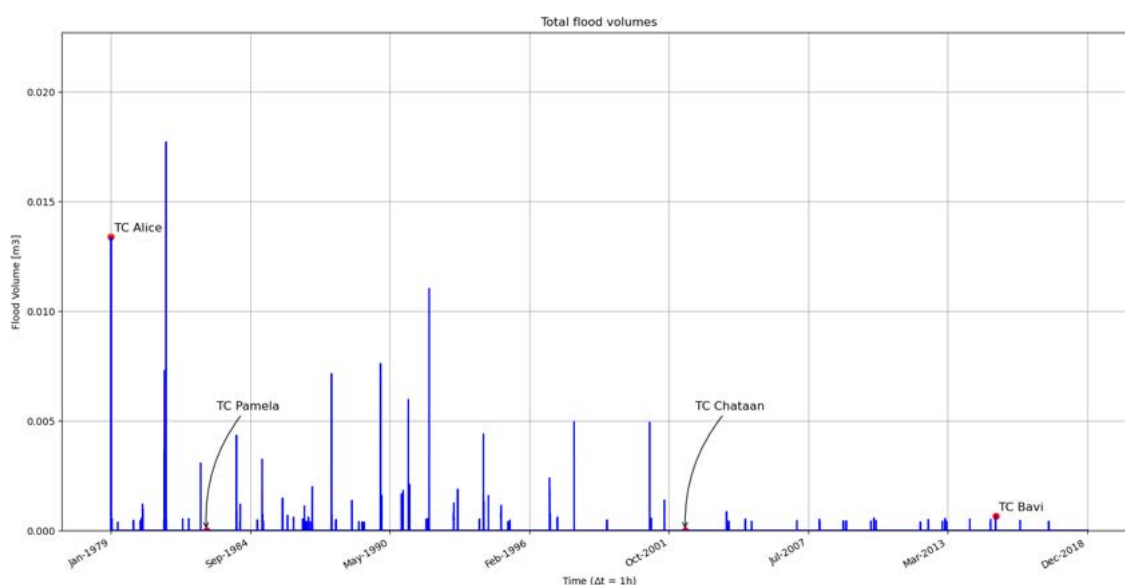


Figura 4.17: Serie temporal de volúmenes totales de rebase en la isla, obtenida con el modelo HyCREWW, con los ciclones tropicales marcados

Al tener una serie histórica de 40 años de duración, los eventos escogidos tienen períodos de retorno relativamente bajos. Dada la susceptibilidad de la isla frente a aumentos del nivel del mar, estos valores son aceptables, ya que las amenazas deben ser estudiadas a corto plazo. En el Capítulo 6: *Discusión* se detalla una fase futura del proyecto, para la extrapolación de eventos con períodos de retorno mayores, mediante el reanálisis con series sintéticas.

Con los hidrogramas caracterizados en cada tramo, se genera un archivo *.bdy* con las condiciones de contorno de caudal variable. En este archivo, se asigna a cada uno de los 36 tramos el hidrograma correspondiente al periodo de retorno de cálculo.

4.2.2. Modelo LISFLOOD-FP

El modelo LISFLOOD-FP funciona a través de un archivo *.par* donde se detallan las características del proyecto:

- DEM (archivo *.dem.asc*)
- Condiciones de contorno espacio-temporales (archivos *.bci* y *.bdy*)
- Tipo de *solver* utilizado
- Tiempos de simulación y de guardado de resultados, así como valor inicial para el cálculo del paso de tiempo
- Coeficientes de fricción de Manning empleados

En el caso de estudio, el DEM aportado es el ráster de Kwajalein preprocesado en formato ASCII, con 397x397 celdas cuadradas de 10 metros de lado, con precisión vertical de milímetros.

Por otro lado, las condiciones de contorno se diferencian en dos tipos: uno, en el que se establecen alturas de la columna de agua fijas en 1 metro a lo largo del perímetro exterior; y otro, donde se introducen los hidrogramas en el segundo perímetro. De esta forma, se evita la generación de calados mayores que la cota de la berma en los metros antes de la misma.

El tiempo de simulación son 49 horas, guardando resultados en periodos de 3 horas, mientras que se utiliza un coeficiente de Manning constante a lo largo de toda la isla igual a 0.06. El *solver* utilizado es el *acceleration model*.

4.2.3. Outputs LISFLOOD-FP

LISFLOOD-FP ofrece diversos resultados en forma de datos numéricos o archivos ráster. Son los segundos los que resultan de interés en este estudio, dado su carácter visual, aunque las matrices de valores numéricos (por ejemplo, de volúmenes de agua en cada instante) han sido utilizadas para la evaluación de los resultados.

Los mapas de inundación utilizados para el proceso descrito en esta metodología son los mapas de máximas profundidades, que muestran las máximas profundidades de la columna de agua obtenida en cada celda a lo largo de todo el tiempo de simulación. Existen otros *outputs* del modelo, como son los mapas de máximas elevaciones, pero en este caso resultan de más utilidad las profundidades, principalmente para el uso de las curvas de daño (apartado 4.4.2: *Proceso de cálculo de la vulnerabilidad*).

Para la elaboración de la amenaza desde el punto de vista cualitativo, se establecen índices color-numéricos (I_H) en función del calado, como se muestra en la Tabla 4.1. Tras esto, se reclasifica el ráster de las máximas inundaciones mediante softwares GIS, atribuyendo a cada celda un índice de 1 a 5 (de mayor a menor intensidad) y un color en función de su valor de cota. Esta reclasificación permite una aproximación más sencilla a la amenaza real, puesto que se establece una relación numérica y visual entre los máximos calados de inundación y la severidad de esa amenaza.

Como se puede apreciar en la tabla, se asume que a partir de 1 metro de profundidad de agua la amenaza es máxima - índice 5 o color rojo. Se considera que ese calado de agua dificulta mucho la evacuación, además de generar daños bastante elevados en las edificaciones. Se debe recordar que la práctica totalidad de la edificación de Kwajalein, a excepción de instalaciones especiales como el aeropuerto o las estaciones de tratamiento del agua, es prefabricada o con materiales poco resistentes, y de muy baja cota, siendo generalmente edificios de una o dos alturas, en todo caso nunca superando los tres pisos.

En cuanto al punto de vista cuantitativo, los mapas utilizados para caracterizar la amenaza son directamente los mapas de máxima elevación de la lámina de agua, obtenidos a partir de las simulaciones de LISFLOOD-FP.

Cota de agua [m]	Índice (I_H) y color
0.00 - 0.25	1
0.25 - 0.50	2
0.50- 0.75	3
0.75 - 1.00	4
> 1.00	5

Tabla 4.1: Índices color-numéricos de amenaza según cota de agua.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

El factor clave a la hora de hablar de exposición en Kwajalein, al ser una isla con muy poca variación de altura en el terreno, es la cota. Esta componente del riesgo es clave, ya que una exposición nula implica un riesgo cero; por lo tanto, siguiendo este criterio, en esta isla es la altura respecto al nivel del mar la que genera esta *protección* frente a la inundación.

En este estudio, la exposición sólo es tenida en cuenta en el análisis cualitativo del riesgo, por lo explicado anteriormente, ya que la cota es un término introducido implícitamente en el análisis cuantitativo a través de las curvas de daño (apartado 4.4.2: *Proceso de cálculo de la vulnerabilidad*).

4.3.1. Inputs para la caracterización de la exposición

El dato de partida para la caracterización de la exposición en Kwajalein es el DEM ráster preprocesado, con celdas de 10x10 metros y georreferenciado al geoide EGM2008.

Cabe destacar una disimilitud en la terminología utilizada por el PCRAFI y la utilizada en este estudio en lo que respecta a la exposición. En su base de datos, ofrece una serie de capas GIS que están identificadas bajo el nombre de *Exposure* (exposición, en inglés), en las cuales se identifican los usos de suelo en la isla y se establecen los valores económicos que poseen. Sin embargo, siguiendo la terminología explicada en este estudio, esa información forma parte de la vulnerabilidad, por lo que será utilizada en la determinación de esa componente.

4.3.2. Proceso de caracterización de la exposición

El proceso de caracterización de la exposición se basa en el uso de herramientas GIS, reclasificando espacialmente el terreno en función de su cota (Tabla 4.2).

Como se puede apreciar en la tabla, se ha considerado que las cotas mayores de 3 metros tienen una exposición nula (dando lugar a riesgo cero). Esta decisión está basada en la experiencia, ya que las magnitudes típicas de las inundaciones en la isla no son suficientes para inundar hasta esas cotas, teniendo primero que inundar el terreno bajo las mismas. Del mismo modo, se ha considerado que toda aquella zona de la isla con cota menor a 1 metro está altamente expuesta, puesto que todo evento de rebase la alcanza con facilidad.

Cota del terreno [m]	Índice (I_E) y color
> 2.8	0
2.60 - 2.80	1
2.40 - 2.60	2
2.20 - 2.40	3
2.00 - 2.20	4
< 2	5

Tabla 4.2: Índices color-numéricos de exposición según cota de terreno.

4.3.3. Outputs de la caracterización de la exposición

El resultado cualitativo de la exposición es, por lo tanto, un mapa ráster con las mismas características y forma que el DEM, pero en lugar de cotas del terreno, las celdas tienen como valores numéricos los índices asignados según el criterio antes explicado. Así mismo, a la hora de representar estos valores, se utiliza el código de colores antes mostrado.

4.4. DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad, en este estudio, se determina mediante dos enfoques: uno cualitativo, donde se establece índices para los usos de suelo según su importancia para la isla, y otro cuantitativo, donde se asignan unas curvas de daño a esos mismos usos de suelo, otorgándoles unas pérdidas económicas según la profundidad de agua, en concepto de reposición o restauración del estado normal.

4.4.1. Inputs para la determinación de la vulnerabilidad

Los datos de partida para esta parte de la metodología se extraen del PCRAFI, en forma de capas GIS. En la web de esta iniciativa, existe un repositorio con ciertas islas del Pacífico caracterizadas en base a diversas variables (población, valor económico, uso de suelo, tipología de edificio, etc.). Una de ellas es la vulnerabilidad de Kwajalein, determinada a través de los usos de suelo y el valor económico total de cada uno de ellos. Por ello, para los procesos GIS de esta componente, se ha elaborado un mapa simplificado de usos de suelo a partir de los datos del PCRAFI, caracterizando espacial y económicamente aquellos usos de interés.

Del mismo modo, en el enfoque cuantitativo, se utilizan las curvas de daño de Rueda et al, 2016 [13] como orientación para la construcción de las análogas en este estudio. Principalmente, se utilizan las mismas funciones beta, pero cambiando los coeficientes para establecer una forma que se ajuste mejor a la realidad en Kwajalein.

4.4.2. Proceso de determinación de la vulnerabilidad

En el enfoque cualitativo, se establecen índices color-numéricos en función de la importancia del uso de suelo para la isla. Dada la falta de datos sobre la variable humana, se otorga una importancia mayor en base al criterio económico, y dentro del mismo, se aplica un factor amplificador para ciertas instalaciones críticas, siendo el aeropuerto la más importante, puesto que es la única vía de comunicación y de transporte de la isla. Esta clasificación se puede consultar en la Tabla 4.3.



Figura 4.18: *Shapefile* generado a partir de datos del PCRAFI para la determinación de la vulnerabilidad.

Uso del suelo	Índice (I_V) y color
Prados	1
Edificaciones	2
Plantaciones y cultivos	3
Instalaciones críticas	4
Aeropuerto	5

Tabla 4.3: Índices color-numéricos de vulnerabilidad según uso de suelo.

En cuanto al enfoque cuantitativo, se emplean curvas de daño como forma de expresión de la vulnerabilidad (Figura 4.19). Éstas son construidas sobre la base de la relación entre la intensidad de la amenaza y el daño que provoca. Pueden ser relativas (muestran la pérdida como sobre el valor para cada nivel de intensidad) o absolutas (muestran la cantidad total de daño dependiendo de la intensidad). En este caso, se emplearán curvas de daño absolutas, para así poder agregar finalmente el daño económico sobre la isla.

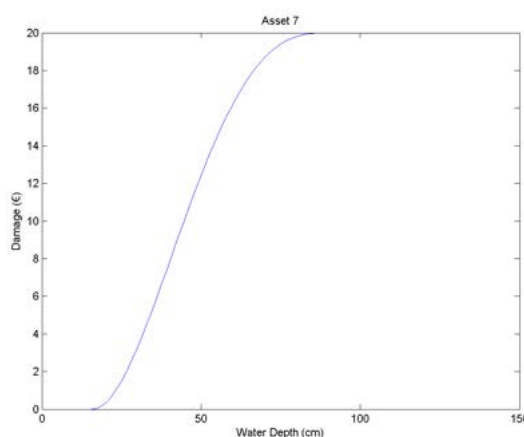


Figura 4.19: Curva de daño tipo, empleando la función beta.

Las curvas de vulnerabilidad representativas del escenario presente no son necesariamente las vigentes en el escenario futuro, ya que dependen del proceso de aprendizaje de las sociedades y del impacto de las medidas de adaptación futuras. La hipótesis habitual es que se mantienen, pero una trayectoria realista nos llevaría a un modelo de vulnerabilidad distinto, dependiente de las políticas bajo desarrollo, las inversiones existentes y los cambios estructurales y sociales previstos. Por último, es necesario contrastar los resultados obtenidos de la aplicación de las curvas propuestas con los daños reales para evaluar su representatividad, con el fin de eliminar o acotar la incertidumbre inherente al proceso seguido.

Para la generación de estas curvas, se utilizan los datos de las capas extraídas del PCRAFI. Dividiendo el valor de cada tipo de suelo entre la superficie que abarca, se obtiene el valor por metro cuadrado (en \$/m²). Cada polígono¹ de cada uso de suelo, por tanto, tiene un valor parcial respecto al total. Esto sirve para establecer los máximos daños económicos en la curva de cada polígono. Por otra parte, el uso de suelo permite establecer la forma de la curva, que en este caso está definida por una función beta (ec. 4.7), aumentando o disminuyendo su pendiente y su concavidad.

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad (4.7)$$

donde

$$B(x, y) = 2 \int_0^{\pi/2} \cos^{2x-1} \theta \sin^{2y-1} \theta d\theta \quad (4.8)$$

siendo α y β los parámetros de la distribución de probabilidad continua, x la variable de análisis y θ la componente angular en coordenadas polares.

4.4.3. Outputs de la determinación de la vulnerabilidad

Los resultados que se obtienen de este proceso son dos: por un lado, se tienen los mapas con los índices para el enfoque cualitativo, y por otro lado, se tienen las curvas de daño asociadas a cada uso de suelo, para el enfoque cuantitativo. Este es el factor diferencial entre las dos perspectivas de este estudio, puesto que la variable económica entra en juego en esta componente, pudiendo cuantificar el riesgo de forma monetaria. Además, es una buena forma de realizar un análisis de sensibilidad del estudio, ya que existen estimaciones de pérdidas del PCRAFI y del Gobierno de las Islas Marshall, tanto por eventos pasados, como por eventos futuros, debido al cambio climático.

4.5. EVALUACIÓN DEL RIESGO

Finalmente, se realiza la estimación del riesgo en Kwajalein a través de los dos enfoques antes comentados.

El primer enfoque, de carácter cualitativo, basa su cálculo del riesgo en una ponderación de las tres componentes antes calculadas, una vez normalizadas a través de los índices numéricos. Se considera que las tres componentes tienen igual relevancia a la hora de la determinación del riesgo, ya que variaciones en cualquiera de las tres suponen notables variaciones en el riesgo.

Añadiendo la probabilidad de ocurrencia de cada una de las componentes, se obtiene la expresión del riesgo. Como tanto la vulnerabilidad como la exposición se basan en datos invariables, se considera que su probabilidad de ocurrencia es 1 en cualquier caso. La amenaza, sin embargo, lleva asociada la

¹ en términos GIS, un polígono es una superficie cerrada cuyas unidades comparten las mismas características, denominadas atributos

probabilidad del evento que la genere ($1/T$). La expresión del riesgo cualitativo, por tanto, queda de la siguiente manera:

$$I_R = \sqrt[3]{(I_H) (I_E) (I_V)} \quad (4.9)$$

siendo I_H, I_E e I_V los índices de amenaza, exposición y vulnerabilidad, respectivamente.

El riesgo, una vez caracterizado, se clasifica según el valor obtenido. El máximo índice de riesgo posible, 125, sería en caso de un evento determinista, es decir, con probabilidad de ocurrencia igual a 1. Sin embargo, hablar de eventos deterministas en el clima no es correcto, por lo que se asume que este índice del riesgo tiene una asíntota en el valor 125. Este índice, por tanto, se clasifica como se ve en la Tabla 4.4.

Índice (I_R) y color	Significado
0	Sin riesgo
0 - 1	Riesgo muy bajo
1 - 2	Riesgo bajo
2 - 3	Riesgo moderado
3 - 4	Riesgo alto
4 - 5	Riesgo muy alto

Tabla 4.4: Índices color-numéricos de vulnerabilidad según uso de suelo.

Por otro lado, el enfoque cuantitativo devuelve como resultado el *Value at Risk* asociado al evento de estudio. Este parámetro, que indica los bienes susceptibles a ser afectados por tal evento, se obtiene como la integración de todos los daños económicos calculados, celda a celda, mediante las curvas de daño asociadas a cada uso de suelo.

$$D_X = \sum_1^n d_i \quad (4.10)$$

siendo D el Value at Risk asociado el evento de cálculo X , medido en \$, n el número total de celdas del dominio, y d_i el daño por celda, medido en \$.

RESULTADOS

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología explicada con los datos disponibles. Las componentes del riesgo se caracterizan espacialmente mediante dos tipos de *outputs*: mapas de índices (uno por cada componente, enfoque cualitativo) y mapas de inundaciones junto con curvas de daño (enfoque cuantitativo).

5.1. AMENAZA

La inundación, entendida como la amenaza es este estudio, varía en función del escenario escogido, como es de esperar. Para poder realizar comentarios acerca de su forma, distribución e intensidad, se ha escogido el mapa de máximas profundidades del escenario de 40 años de periodo de retorno, con un incremento del nivel del mar de 0.5 metros (Figura 5.1). Tanto los hidrogramas introducidos en cada simulación como los mapas de inundación obtenidos, pueden ser consultados en el Anexo A: *Simulaciones realizadas*.

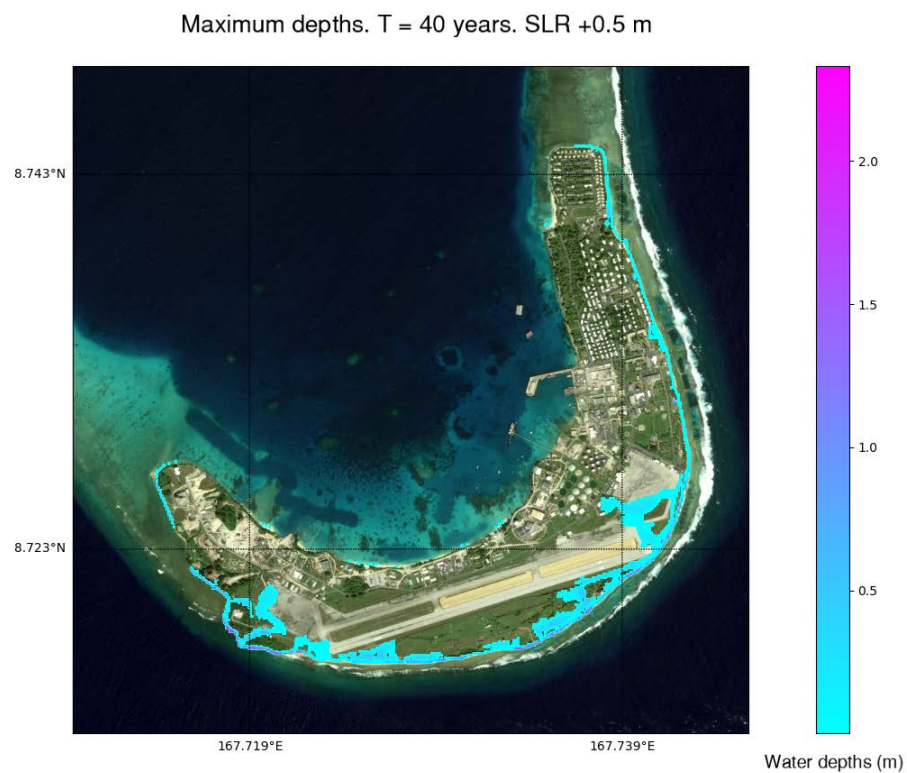


Figura 5.1: Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.

Como se puede observar, la amenaza afecta principalmente a la zona S y SE, donde se ubica el aeropuerto. Existen también rebases en la costa Este de la isla, pero las estructuras de protección en la misma parecen mitigar efectivamente estos flujos de agua.

En cuanto a mapa de índices de amenaza (I_H), se obtienen los siguientes resultados (los colores rojos implican amenazas mayores, mientras que los verdes indican amenazas menores).

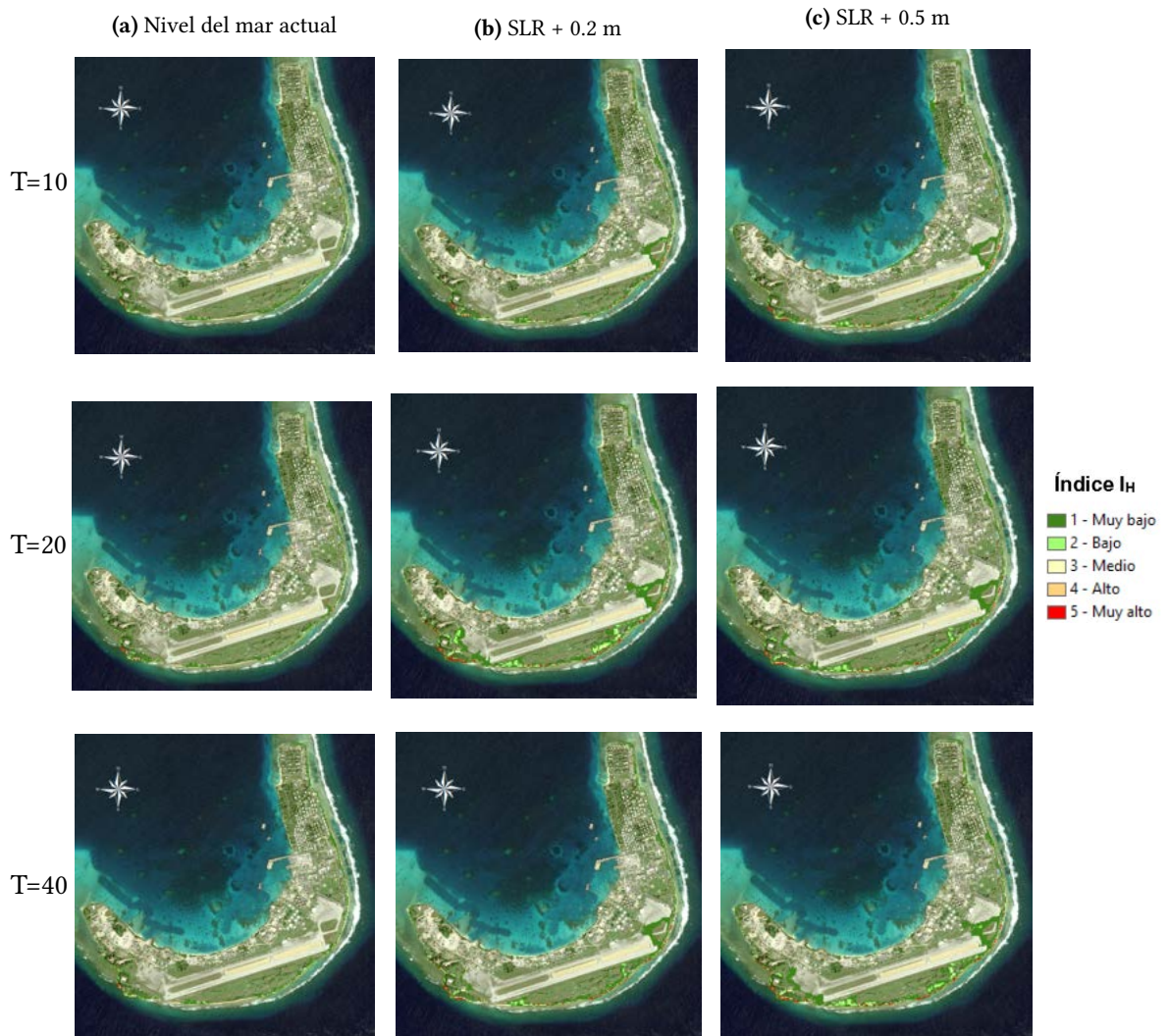


Figura 5.2: Mapas de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Amenaza.

5.2. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad, por su parte, se determina en el enfoque cuantitativo aplicando las curvas de daño mostradas a continuación (Figura 5.3). Éstas se asignan a los usos de suelo generalizados mostrados en el Capítulo anterior. En bases a estos, atendiendo al enfoque cualitativo, la distribución espacial de los índices queda como se aprecia en la Figura 5.4.

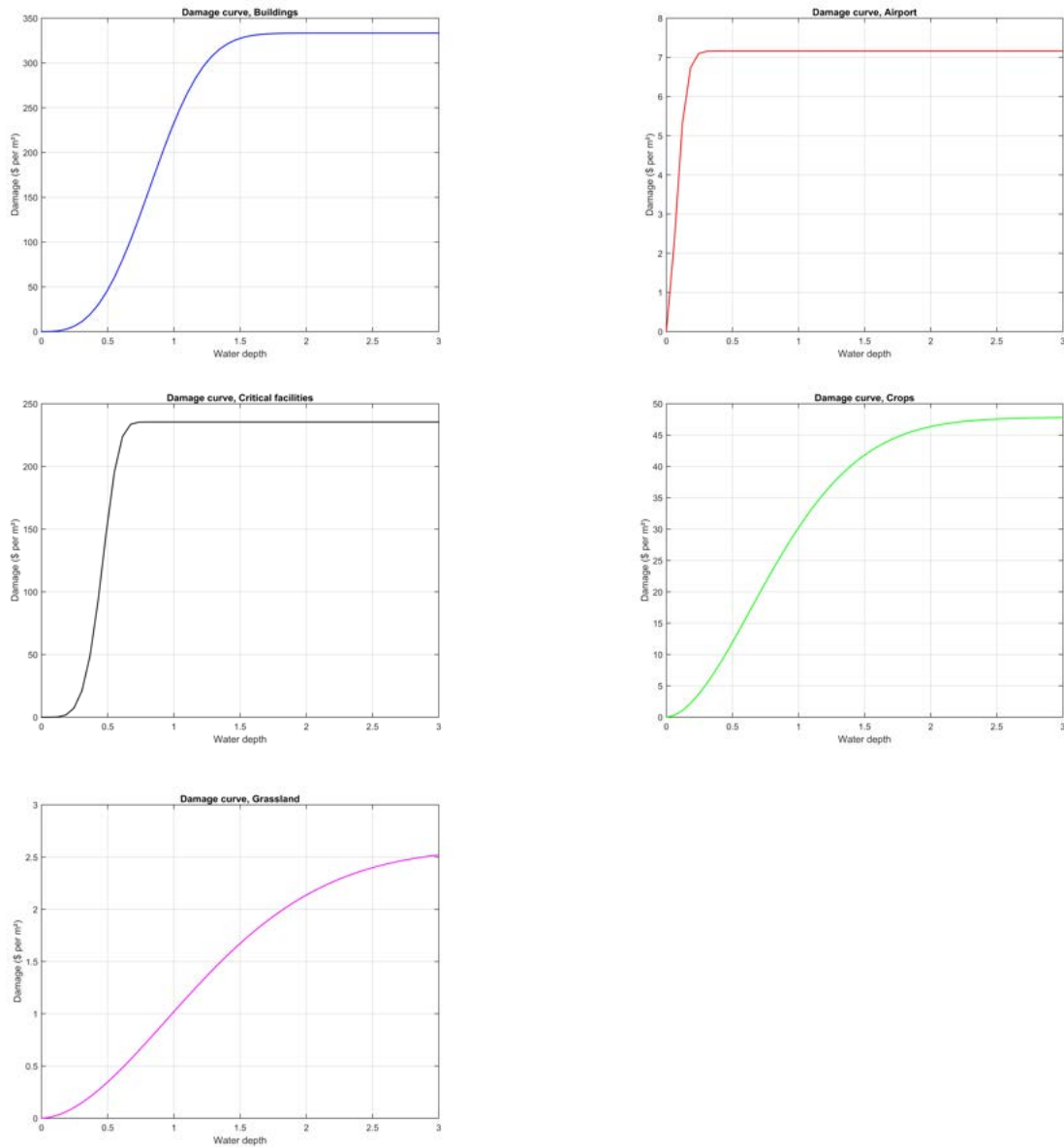


Figura 5.3: Curvas de daño empleadas.

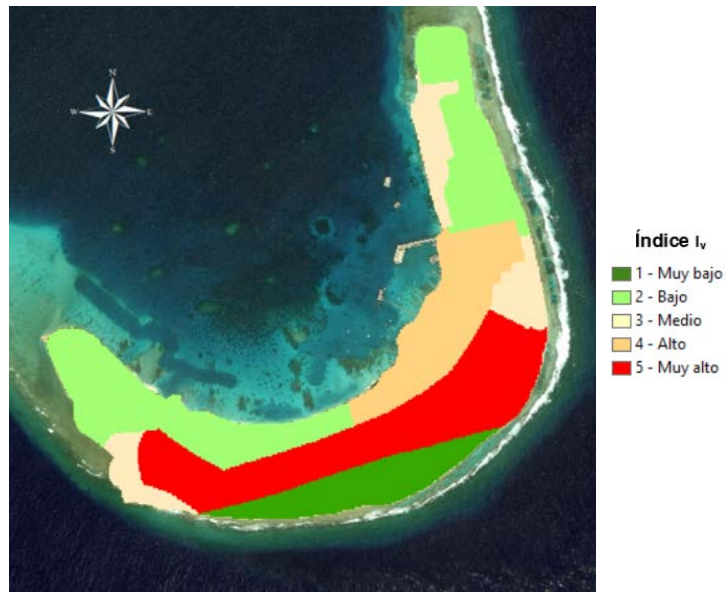


Figura 5.4: Mapa de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Vulnerabilidad

5.3. EXPOSICIÓN

El resultado de la caracterización de la exposición se muestra en la Figura 5.5.

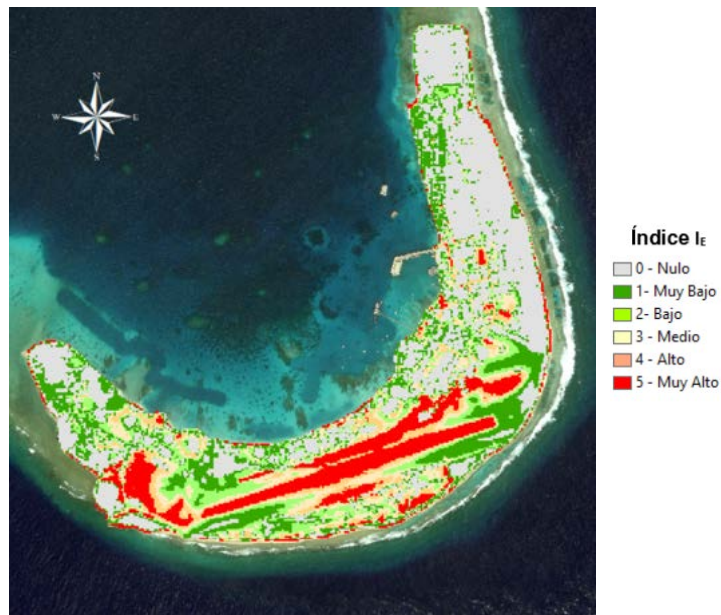


Figura 5.5: Mapa de Kwajalein con las zonas clasificadas por colores según el Índice de Exposición

5.4. RIESGO

Los mapas de riesgo cualitativos obtenidos, en base a lo anteriormente explicado, son los siguientes.

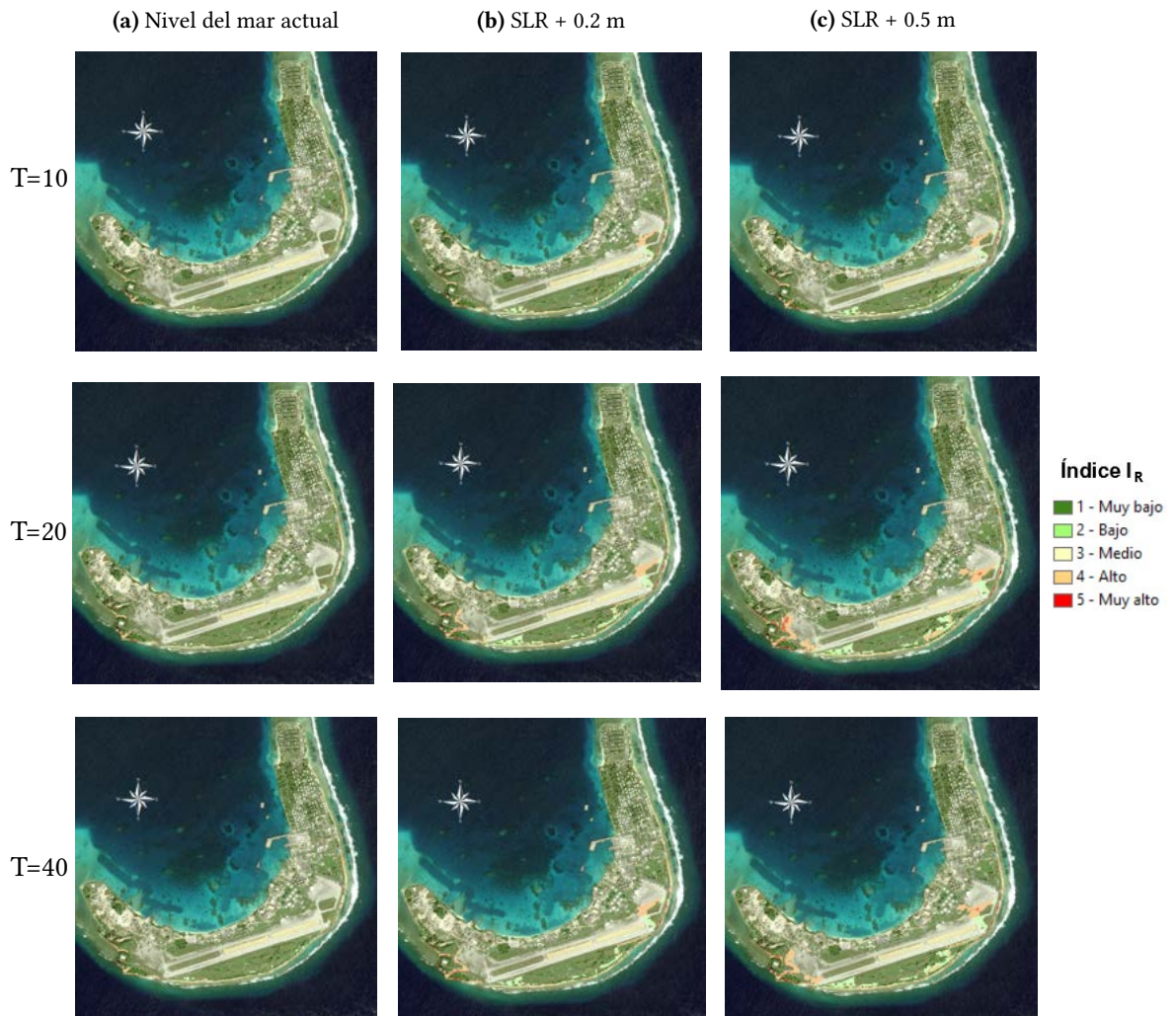


Figura 5.6: Mapas de riesgo del enfoque cualitativo.

En cuanto al análisis cuantitativo del riesgo, los *Values at Risk* en cada escenario se detallan en la Tabla 5.1.

Uso del suelo		Cultivos	Edificaciones	Aeropuerto	Inst. críticas	Prados	VALUE AT RISK
Escenario							
T = 10	Nivel actual	50.261,9	6.278,7	18.519,9	0	7.194,7	82.255 \$
	SLR + 0.2 m	99.267,9	119.462	78.262,2	121,8	5.339,2	302.453 \$
	SLR + 0.5 m	124.348	126.211	98.355,9	316,2	9.897,02	359.128 \$
T = 20	Nivel actual	96.409,4	9.038,6	27760	0	2.684,4	135.892 \$
	SLR + 0.5 m	191.473	274.853	215.326	197,7	15.480,5	697.330 \$
	SLR + 0.2 m	292.305	438.418	400.818	0	22.985,4	1.154.526 \$
T = 40	Nivel actual	73.952	12.103,5	30.261,8	0	2.816,2	119.133 \$
	SLR + 0.2 m	192.708	287.364	163.772	0	13.691,6	657.536 \$
	SLR + 0.5 m	256.761	467.871	354.289	0	22.678,3	1.101.599 \$

Tabla 5.1: Value at Risk de cada evento simulado (\$). NOTA: Los valores económicos de cada uso de suelo están basados en los datos extraídos del PCRAFI.

Los mapas de daño obtenidos, con el daño calculado en cada celda según una escala de colores desde 0 hasta el daño máximo que admite, son los siguientes.

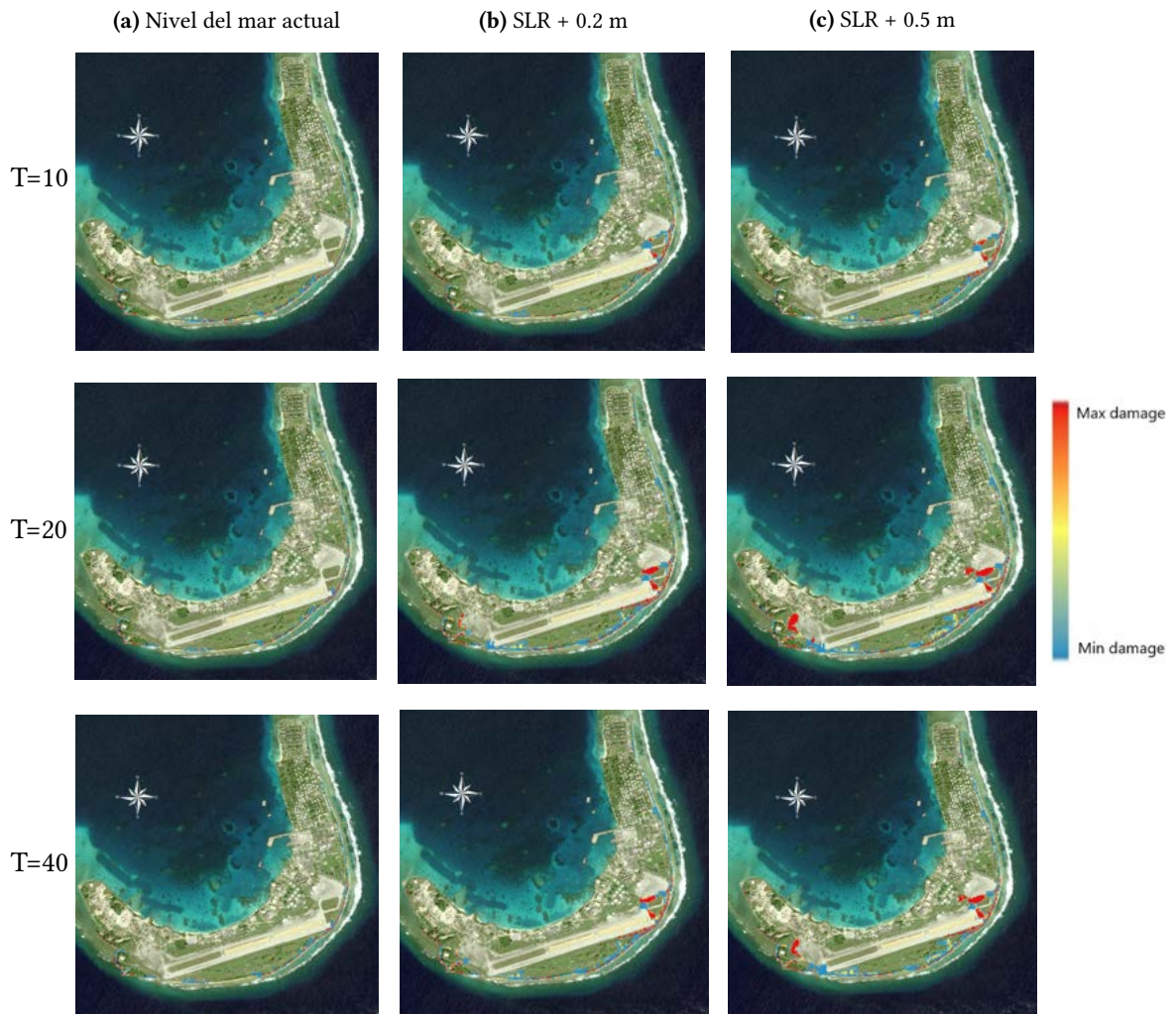


Figura 5.7: Mapas de riesgo cuantitativo, medido según el daño relativo en cada celda.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

El primer aspecto susceptible de ser cuestionado es el posible error acumulado debido al largo proceso del proyecto, en el cual se encadenan diversos modelos numéricos. El establecimiento de diferentes hipótesis y las diferentes sensibilidades de cada modelo, generan una suma de incertidumbres que deben asumirse para continuar el proceso. Un factor que introduce bastante incertidumbre al proceso es la baja calidad de los datos de la batimetría en la zona. Una mejora en la calidad de la misma supondría una disminución considerable en el error en la propagación del oleaje, así como una menor incertidumbre en los procesos físicos modelados para calcular el *run-up* y el rebase. En el caso de este estudio, ubicado en la parte final del proyecto, a la incertidumbre arrastrada por los modelos anteriormente ejecutados, se le debe añadir la propia del LISFLOOD-FP y del preprocesado del DEM. Esta dependencia de la calidad del DEM es considerable y es bastante frecuente en modelos de inundación o propagación del oleaje, haciendo que su preproceso sea esencial para la obtención de resultados precisos. Una diferencia de decenas de centímetros puede implicar cambios significativos en los caudales de rebase, así como cambios en la facilidad de inundación de ciertas superficies de la isla, por lo que se asume cierta incertidumbre en los resultados del modelo, derivada de la calidad del DEM usado.

Otro aspecto reseñable son los bajos caudales de rebase aportados por el modelo HyCReWW. Al tratarse de un modelo extremadamente simplificado con el objetivo de aumentar su eficiencia computacional, el error asociado a sus cálculos es considerable, haciendo necesaria una comparación con el modelo HySWASH. Esto lleva a la consideración de que, en un caso como este, con pocos eventos de rebase y caudales relativamente bajos, el modelo HySWASH puede ser más robusto. Los resultados aportados, sin embargo, son realistas, atendiendo a las evidencias históricas en la isla.

Por otra parte, la selección de eventos con tan bajo período de retorno no es habitual, pero se debe a la fase en la que se encuentra el proyecto, de análisis de las series históricas. En las siguientes fases, de las cuales este estudio se encuentra fuera, se realizarán análisis de series sintéticas, pudiendo de esta forma realizar extrapolaciones a períodos de retorno mucho mayores y de más amplio uso. En este análisis, conociendo las variaciones futuras de una variable de control (por ejemplo, el *Total Water Level*), se realizan modificaciones en el resto de variables (H_s , T_m , θ , *storm surge*, *astronomical tide*) mediante un análisis multivariado y de probabilidad conjunta, realizando así un análisis de la influencia de cada variable oceánica en la inundación en Kwajalein.

Respecto al modelo numérico LISFLOOD-FP, la discusión puede derivarse en dos ramas: defectos encontrados durante su uso y posibles mejoras a la metodología seguida en este estudio.

En cuanto a los defectos encontrados, cabe destacar la sensibilidad del modelo respecto al DEM aportado. Con el primer Modelo utilizado (con precisión vertical de 1 metro), se dieron discontinuidades numéricas en los cálculos, dando lugar a mapas de inundación irreales o directamente erróneos. Esta sensibilidad frente al gradiente de cota del DEM lleva a cuestionar en cierto modo la fiabilidad de los cálculos finales (obtenidos con un DEM de precisión milimétrica), ya que ese mismo problema ha podido pasar desapercibido, pero ha podido generar cierto error que se ha arrastrado en el proceso,

generando resultados poco rigurosos. Del mismo modo, otro aspecto que debe ser mencionado es el necesario y costoso preprocesado del Modelo, ya que la vegetación genera barreras virtuales que impiden la correcta modelización de la inundación. Al ser una isla relativamente pequeña, el tamaño de celda del ráster es bajo y representa con precisión el terreno, haciendo que el preprocesado manual siga siendo factible. Sin embargo, para inundaciones de grandes superficies, con mayores tamaños de celda, este preprocesado debe ser automatizado. Además, al no disponer de más información más allá del ráster, se debe confiar en la verosimilitud del mismo, por lo que estas modificaciones manuales pueden, sin querer, ser excesivas, desfigurando la configuración real del terreno.

En cuanto a las posibles mejoras de la metodología seguida en lo relativo a la modelización de la inundación, el modelo LISFLOOD-FP permite la inclusión de un coeficiente de Manning variable a lo largo del DEM. Este coeficiente n está asociado al tipo de suelo, por lo que una identificación del tipo de suelo de cada celda sería necesaria. Por ejemplo, se podría asignar un uso de suelo según el RGB de cada celda (definiendo previamente una relación entre colores y tipo de suelo). Así mismo, sería interesante la inclusión de los volúmenes de lluvia, sobre todo en los eventos de ciclones tropicales. Mediante la adición de esta variable, se podría realizar un análisis de sensibilidad, comparando las manchas de inundación obtenidas con los eventos registrados en fotografías. Esta modelización debería incluir la percolación de la lluvia en el terreno, que podría ser modelada a través de modelos como, por ejemplo, el de Horton (1933). Sin embargo, en este estudio son de interés las simulaciones con percolación nula, ya que se pretende simular una obstrucción de la red de saneamiento debido al *reverse flow* inducido por el oleaje intenso o las *high tides*.

Otro aspecto clave que puede observarse en la Figura 4.10 es que a partir del año 2000 la intensidad en los rebases disminuye notablemente. Esta heterogeneidad (o *inhomogeneidad*, valga la expresión) es un aspecto que requiere de un análisis en búsqueda de su origen. También, en la Figura 4.17 se puede observar como sólo el ciclón Alice en 1979 y el ciclón Bavi en 2015 generaron volúmenes de rebase. Esto señala la no relación entre los ciclones y los rebases, y sugiere una dependencia mayor con las trayectorias de los mismos, con especial influencia en la generación de *fetchs* grandes en la laguna interior.

El doble análisis de este estudio, desde perspectivas cualitativa y cuantitativa, permite una valoración agregadora del riesgo, puesto que al estudio económico se le añade la valoración de la importancia del uso de suelo para la isla, lo cual no es medible a través de valores monetarios. Esto se puede apreciar claramente en la zona del aeropuerto. Mientras que el enfoque económico no dota de gran valor al metro cuadrado de suelo, el enfoque cualitativo lo sitúa a la cabeza en importancia dentro de la isla, dando mayores riesgos en su zona oriental. El hecho de que Kwajalein sea una isla relativamente alejada de grandes poblaciones la hace altamente dependiente de su comunicación aérea, motivo por el cual, en este caso, el análisis cualitativo incluye esa relevancia. Cabe destacar que las funciones de daño han sido elaboradas en base al valor económico aportado por el PCRAFI y a su operatividad. En el caso del aeropuerto, por ejemplo, pese a que el valor del metro cuadrado es bajo, la operatividad a partir de 0.20 m de lámina de agua es casi nula, por lo que el daño económico debe ser consecuente con ello.

Desde un enfoque más holístico, sería muy apropiada la inclusión del factor humano, ya que lo máspreciado son las vidas de las personas, cuyas pérdidas son insustituibles. Ante la falta de datos de carácter poblacional, este estudio se ha centrado en el análisis económico y estructural, pero claramente faltan enfoques como el humano o el ambiental para poder considerar el estudio como completo. Así mismo, otro dato de interés podría ser la distribución de la red de saneamiento, para poder modelar correctamente la inundación únicamente pluvial, bastante frecuente con el paso de ciclones tropicales.

Por último, analizando los resultados, se comprueba que los valores obtenidos son consistentes con los registros históricos de la isla, donde la problemática se concentra principalmente en la zona del aeropuerto, con frecuentes rebases y entradas de material por *overwash*. Así mismo, el análisis

cuantitativo desprende unos valores monetarios que encajan con los valores totales de reposición esperados, ya que a estos eventos de inundación costera representan una parte de las amenazas bajo las que se encuentra la isla, como la inundación pluvial, los terremotos, los ciclones tropicales, la sequía y la salinización de los acuíferos. Por registros históricos locales, se ha constatado que los eventos más intensos de inundación se producen con lluvias intensas y fuerte oleaje acoplado con un nivel del mar alto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El modelo de inundación LISFLOOD-FP se adapta de forma correcta a estudios como el presente, con dominios pequeños y topografías suaves, ya que sus simplificaciones permiten la realización de simulaciones a un bajo coste computacional. Sin embargo, el preproceso del Modelo Digital de Elevaciones es casi obligado y por lo tanto, introduce una fuente de error que debe ser indicada y tenida en cuenta.
2. Al realizarse el análisis de máximos tomando como variable el volumen total entrante en la isla, el incremento en los periodos de retorno de los eventos no implica necesariamente una mayor intensidad de la amenaza, ya que es la distribución espacial de la misma la que determina su intensidad. Esto se puede comprobar en los mapas de riesgo de período de retorno 20 y 40 años, donde contra toda lógica es el primero el que va acompañado de más riesgo. Esto puede deberse a la concentración de rebases en zonas con más valor económico y más expuestas, derivando por lo tanto en mayores riesgos y daños. Es posible que esto se deba a las variables oceánicas del evento escogido, de entre las cuales la dirección del oleaje y el Total Water Level determinan la distribución e intensidad de los rebases.
3. El aumento del nivel medio del mar implica grandes reducciones de los períodos de retorno. Por ejemplo, el evento que actualmente tiene período de retorno 20 años, con un aumento de 0.20 metros tiene un periodo de retorno de 3.33 años, y con un aumento de 0.50 metros, de 2.5. Es decir, los períodos de retorno se reducen seis y ocho veces, respectivamente. Esto implica una mayor frecuencia en la generación de cotas de inundación destructivas, con su consecuente aumento de la amenaza. En la Tabla 7.1 y en la Figura 7.1 se pueden consultar estos cambios de frecuencia e intensidad.

<div>Nivel del mar</div> <div>Periodo de retorno (años)</div>	Nivel del mar actual	SLR +0.2 m	SLR +0.5 m
T = 10	10	2.85	2.27
T = 20	20	3.33	2.50
T = 40	40	5.88	3.13

Tabla 7.1: Variaciones de los períodos de retorno (años).

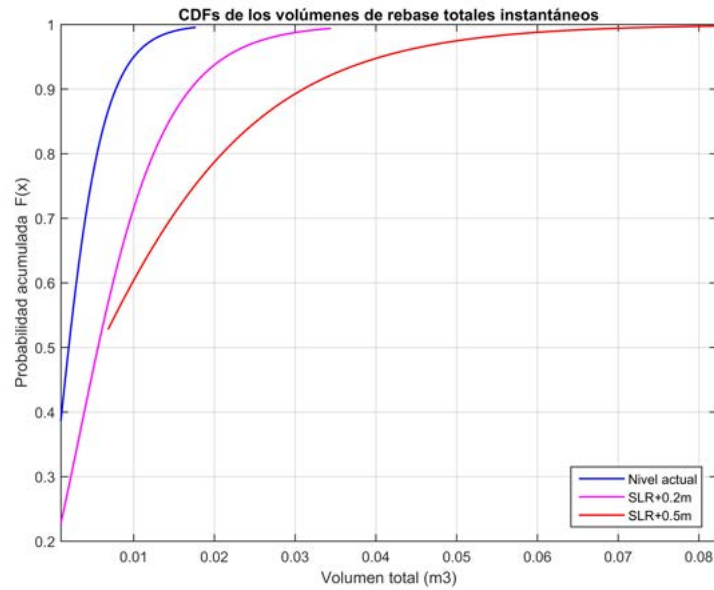


Figura 7.1: Comparación de los ajustes Gumbel de Máximos Anuales para los tres escenarios de nivel del mar.

- El incremento del daño económico debido al aumento del nivel del mar es notable, incrementándose entre 3 y 9 veces el valor correspondiente al nivel del mar actual (Tabla 7.2). Sin duda alguna, esto genera la necesidad de establecer una preparación económica frente a estos futuros eventos, ya que tan sólo se está agregando el daño por inundación costera, debiendo añadir las sequías, los tifones, los terremotos, la salinización de los acuíferos y las inundaciones pluviales.

Periodo de retorno (años) \ Nivel del mar	Nivel del mar actual	SLR +0.2 m	SLR +0.5 m
T = 10	1	3.7	4.4
T = 20	1	5.1	8.5
T = 40	1	5.5	9.3

Tabla 7.2: Aumento de los daños económicos por aumento del nivel del mar, medido como el cociente entre el daño del escenario en cuestión y el escenario con nivel del mar actual.

- Las zonas más afectadas son el Sur y el Este de la isla, principalmente en la zona del aeropuerto. Es recomendable la activación de políticas de adaptación al cambio climático en estas zonas de la isla, considerándose las más idóneas para esta problemática la mejora de las defensas costeras (actualmente ciertas zonas están protegidas con escolleras un tanto artesanales) o el uso de vegetación submarina para la disipación del oleaje. Así mismo, en base a la información descrita en el *Country Note 2015* del PCRAFI ([12]), tan sólo existen dos aseguradoras en Kwajalein, ambas situadas fuera de las Islas Marshall. Respecto a esto, se considera una oportunidad para el establecimiento de aseguradoras locales especializadas, cuya función sea el aseguramiento de los habitantes de Kwajalein en base a los riesgos bajo los que se encuentran.
- Teniendo en cuenta la dependencia de los modelos de rebase y *run-up* de la calidad de la batimetría, se considera necesaria la mejora de los datos batimétricos disponibles, ya que los utilizados no tienen la calidad deseada. Esto genera una fuente de errores, que incorporados a los existentes en el flujo de trabajo pueden derivar en otros órdenes de magnitud de imprecisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aguirre, I., Aniel, I., Gonzalez, M. Apuntes de la asignatura M1866 - *Análisis de Riesgo Geológico: Tsunamis*. Curso 2019/2020 del Máster de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria.
- [2] Bates P., Horritt M.S., Fewtrell T.J. (2010), *A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling*, Journal of Hydrology. 387, 33–45. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>.
- [3] Bates P., Trigg M., Neal J., Dabrowa A., *LISFLOOD-FP User Manual*, ver. 5.9.6, 2013. School of Geographical Sciences, University of Bristol. dirección: <http://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/geography/migrated/documents/lisflood-manual-v5.9.6.pdf>.
- [4] Brown et al (2020), *Land raising as a solution to sea-level rise: An analysis of coastal flooding on an artificial island in the Maldives*, Journal of Flood Risk Managment. 13 (Supl.1). dirección: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12567>.
- [5] Camus et al (2011), *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*, Coastal Engineering. 58, 453–462. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>.
- [6] De Almeida G.A.M., Bates P., (2013), *Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modelling*, Water Resources Research. 49(8), 4833–4844. dirección: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20366>.
- [7] Gallien et al (2018), *Coastal Flood Modeling Challenges in Defended Urban Backshores*, Geosciences. 8, 450. dirección: <https://doi.org/10.3390/geosciences8120450>.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC). United Nations, United Nations, dirección: <https://www.ipcc.ch/> (visitado 12-07-2020).
- [9] Méndez, F.J., Rueda, A.C. Apuntes de la asignatura M1867/M2056 - *Análisis de Riesgo Hidrometeorológico: Inundación Costera y Fluvial*. Curso 2019/2020 del Máster de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria.
- [10] Méndez, F.J., Rueda, A.C. Apuntes de la asignatura M2065 - *Bases Teóricas y Prácticas para la Evaluación del Riesgo*. Curso 2019/2020 del Máster de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria.
- [11] Olson, W. (2017). *Under the radar: Life is low-tech at Army missile defense base in the Pacific*. Stars and Stripes, dirección: <https://www.stripes.com/news/pacific/under-the-radar-life-is-low-tech-at-army-missile-defense-base-in-the-pacific-1.458322> (visitado 29-07-2020).
- [12] Pacific Catastrophe Risk Assessment Financing Initiative, World Bank Group, *Country Note. Marshall Islands. Disaster Risk Financing and Insurance*. International Bank for Reconstruction y Development, 2015.
- [13] Rueda et al (2016), *The use of wave propagation and reduced complexity inundation models and metamodels for coastal flood risk assessment*, Journal of Flood Risk Managment. 9, 390–401. dirección: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12204>.
- [14] Rueda et al (2019), *HyCReWW: A Hybrid Coral Reef Wave and Water level metamodel*, Computers and Geosciences. 127, 85–90. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.03.004>.
- [15] Salido, J. (2019). Plantilla guía de TFG para la ESI-UCLM. GitHub, ed., Universidad de Castilla-La Mancha, dirección: https://github.com/JesusSalido/TFG_ESI_UCLM.

- [16] Sosa et al (2019), *A toolbox to quickly prepare flood inundation models for LISFLOOD-FP simulations*, Environmental Modelling and Software. 123, 104561. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104561>.
- [17] Stuart G. Pearson, *Predicting wave-induced flooding on low-lying tropical islands. Using a Bayesian network*, Degree Thesis. Delft University of Technology, 2016. dirección: <http://repository.tudelft.nl/>.
- [18] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*. 2015. dirección: <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework>.
- [19] University of Bristol. School of Geographical Sciences, *Hydrology models: LISFLOOD-FP*. dirección: <http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/> (visitado 25-04-2020).

ANEXOS

SIMULACIONES REALIZADAS

El presente Anexo tiene como finalidad la muestra de los hidrogramas utilizados de las simulaciones realizadas. Para evitar una cantidad excesiva de figuras (ya que son 36 hidrogramas, uno por tramo), se ha agregado el caudal entrante en la isla en un único hidrograma mediante la suma de todos los caudales instantáneos de cada tramo. Los escenarios futuros se corresponden con las proyecciones de subida del nivel del mar por el cambio climático de 0.20 y 0.50 metros para final de siglo. Cabe destacar que estas dos proyecciones son las menos severas, por lo que se puede considerar que los escenarios escogidos no son generadores de grandes desastres, pero tampoco dejan el estudio del lado de la seguridad. En la Tabla A.1 se pueden consultar las simulaciones realizadas.

Periodo de retorno (años) \ Nivel del mar	Nivel del mar actual	SLR +0.2 m	SLR +0.5 m
T = 10	x	x	x
T = 20	x	x	x
T = 40	x	x	x

Tabla A.1: Simulaciones realizadas

Todas las simulaciones comparten ciertos parámetros y características:

- Coeficiente n de Manning igual a 0.06, constante en todo el dominio.
- Duración de los eventos de 49 horas, con el pico de caudal en la hora central.
- Guardado de resultados cada 3 horas
- Paso inicial de 10 segundos

Además, se incluye la simulación realizada con el hidrograma sintético, realizada a modo de calibración de los inputs del modelo LISFLOOD-FP. En ella, se introduce un hidrograma triangular constante en todos los perfiles, de 10 horas de duración y pico de caudal de 50 L/s.m.

A.1. EVENTO SINTÉTICO

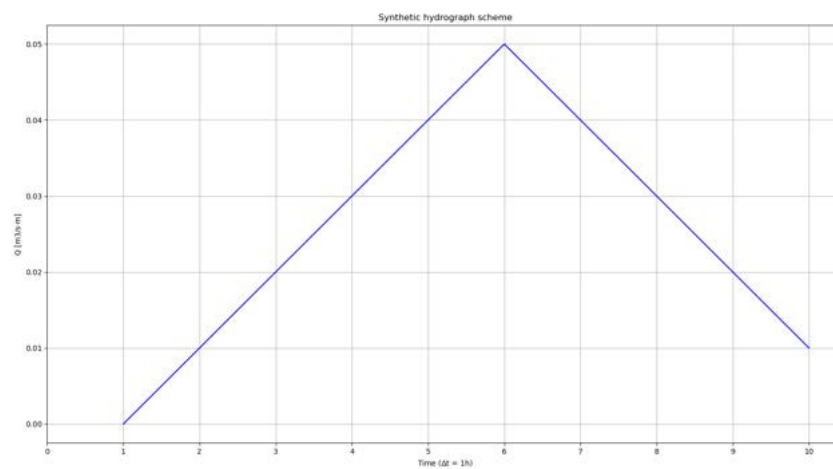


Figura A.1: Hidrograma sintético.



Figura A.2: Inundación obtenida con el hidrograma sintético constante en todos los perfiles.

A.2. PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS

A.2.1. Serie histórica

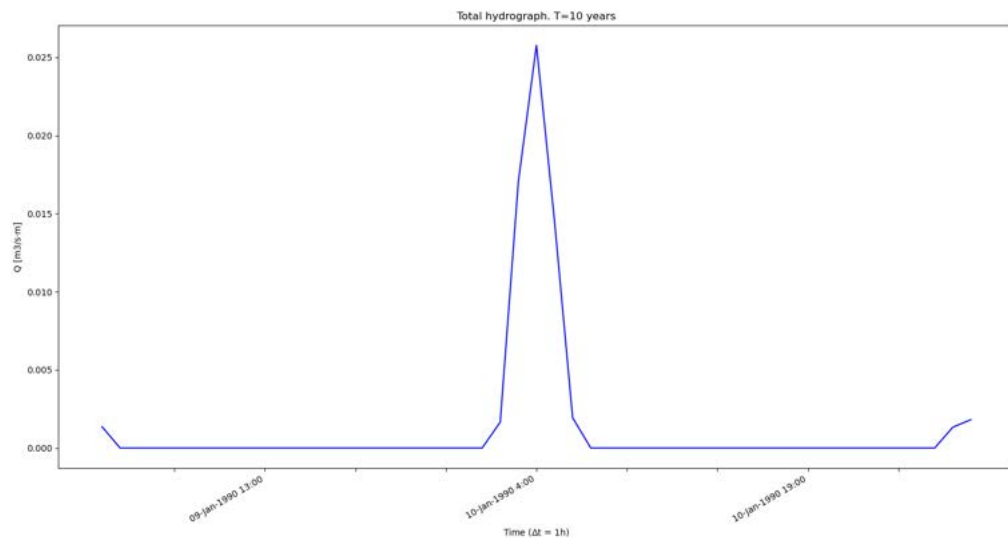


Figura A.3: Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno.

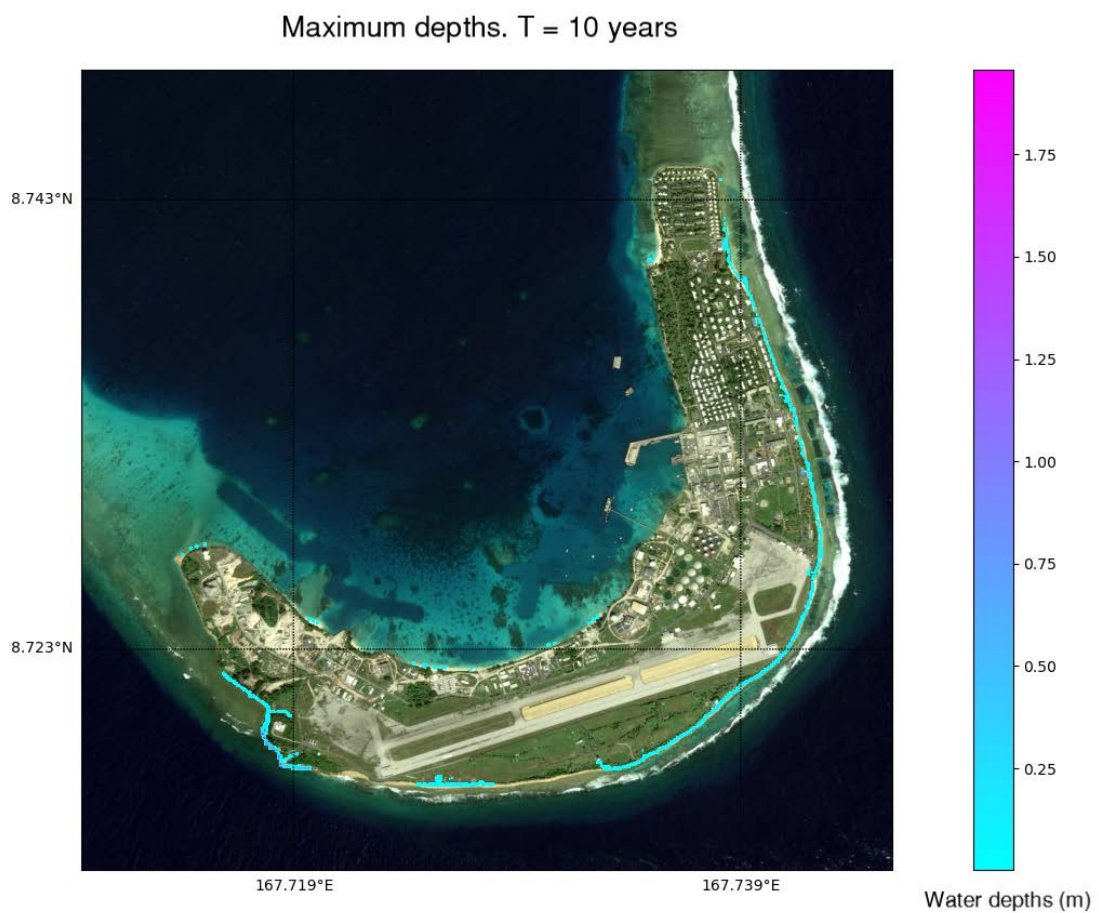


Figura A.4: Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno.

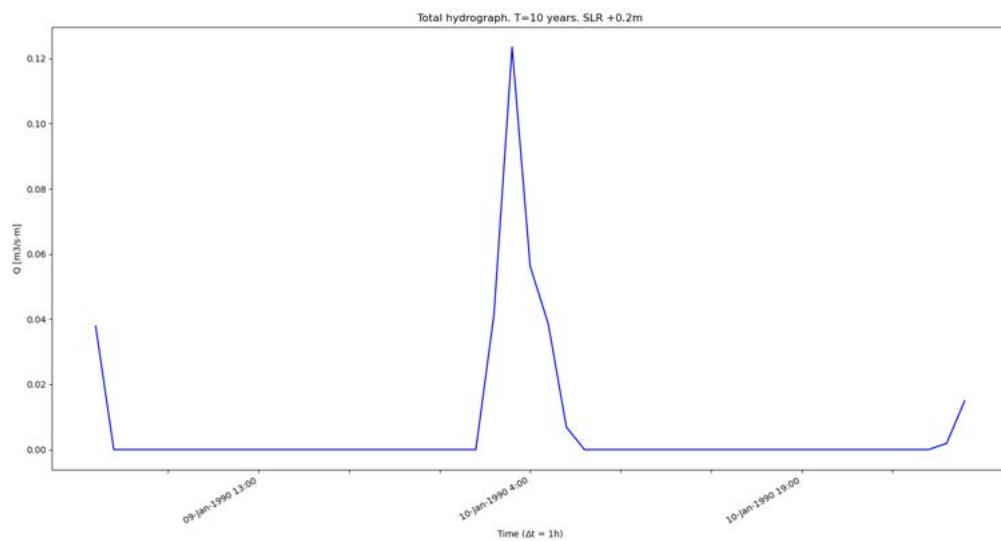
A.2.2. SLR +0.2 m

Figura A.5: Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.

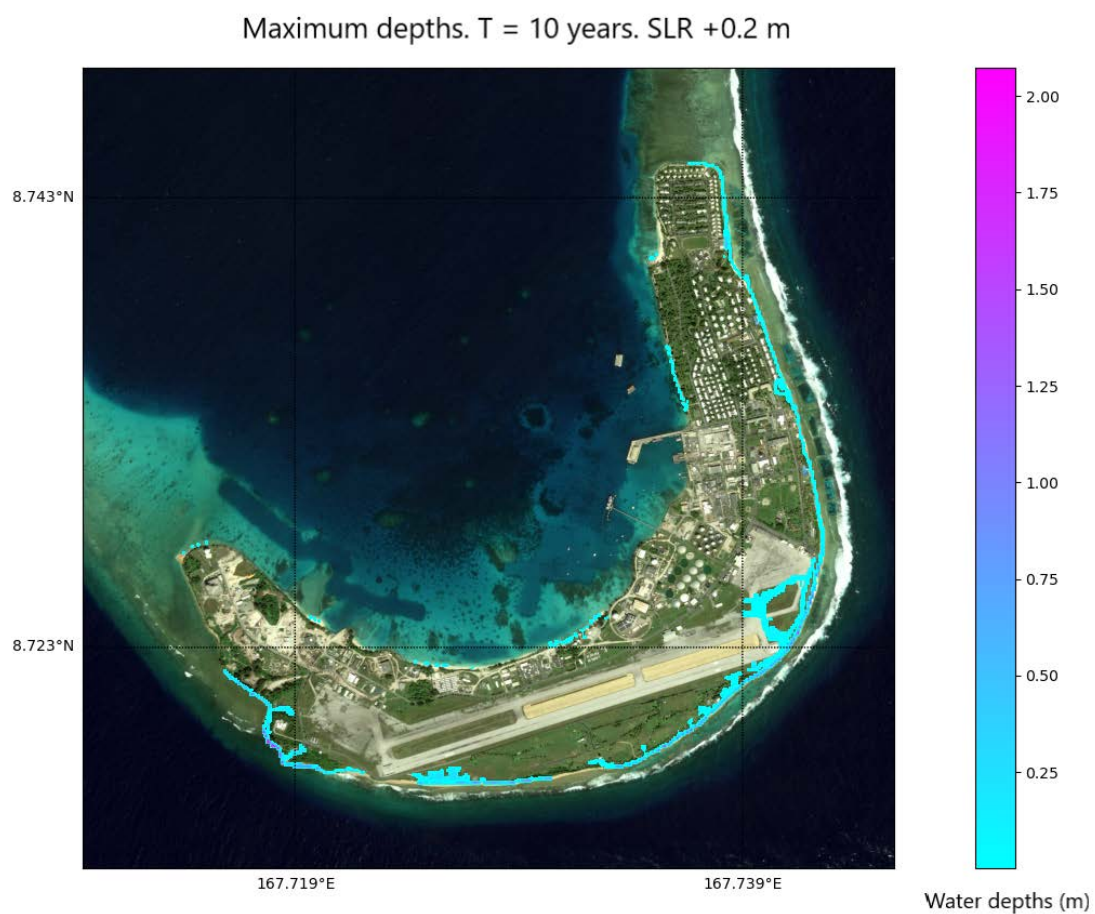


Figura A.6: Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.

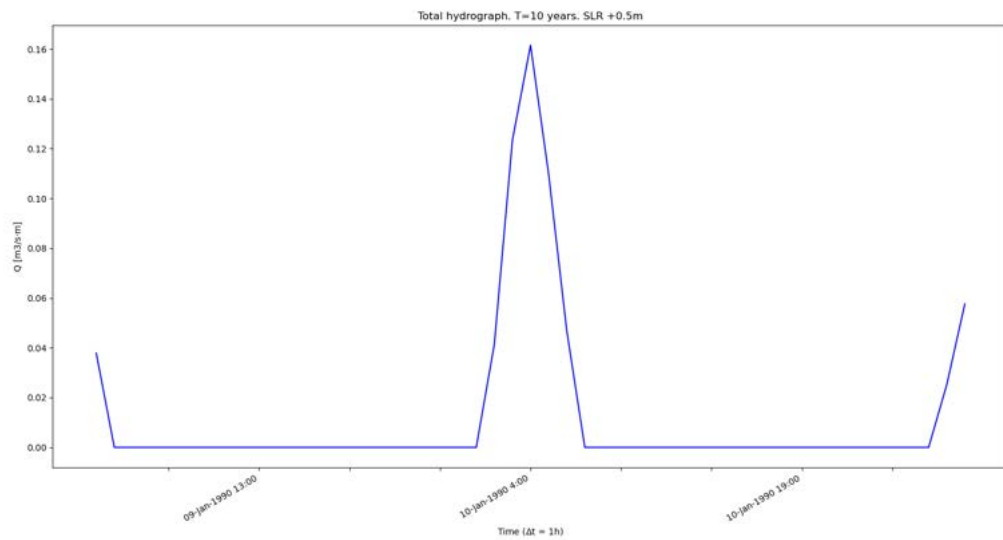
A.2.3. SLR +0.5 m

Figura A.7: Hidrograma agregado para el evento de 10 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.

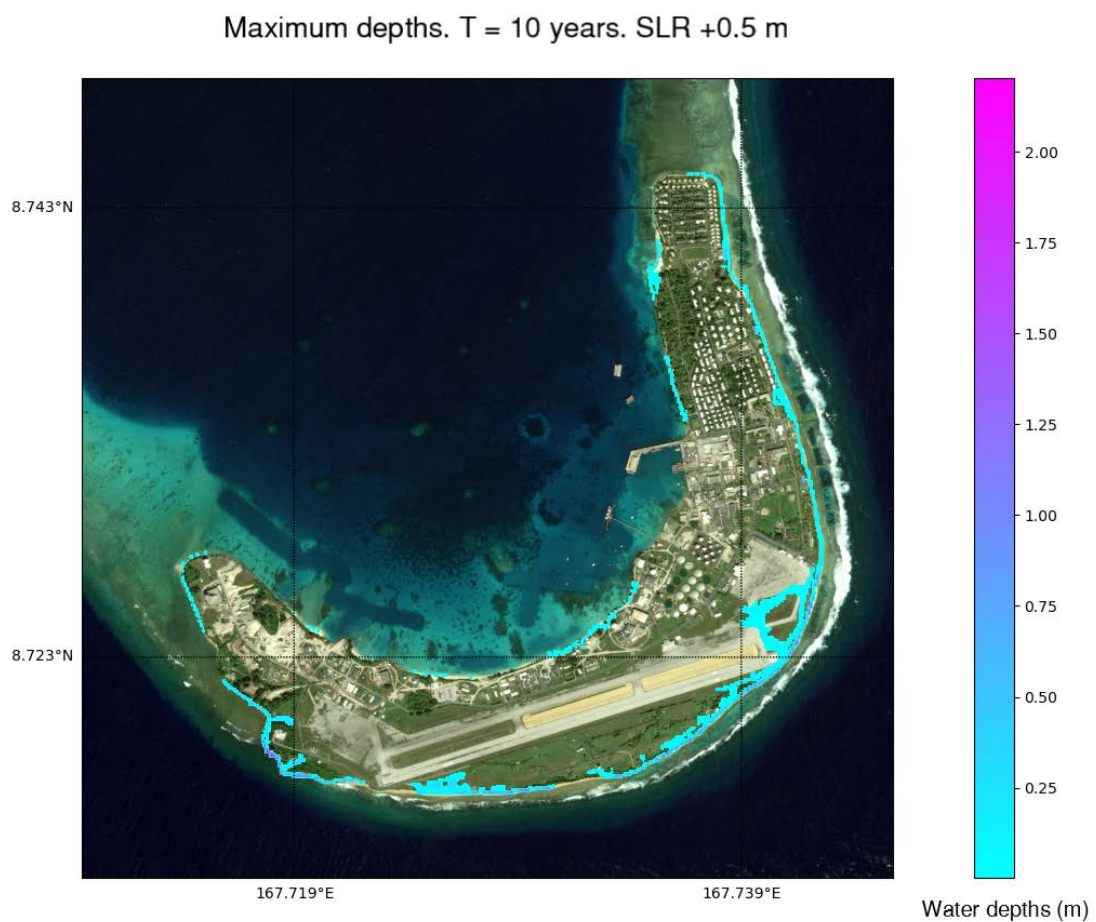


Figura A.8: Inundación obtenida para el evento de 10 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.

A.3. PERIODO DE RETORNO 20 AÑOS

A.3.1. Serie histórica

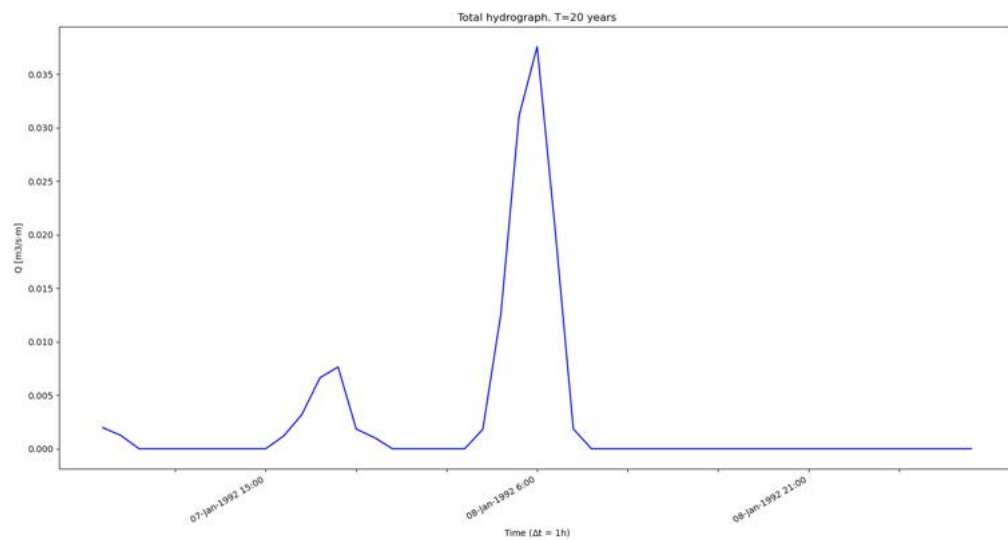


Figura A.9: Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno.

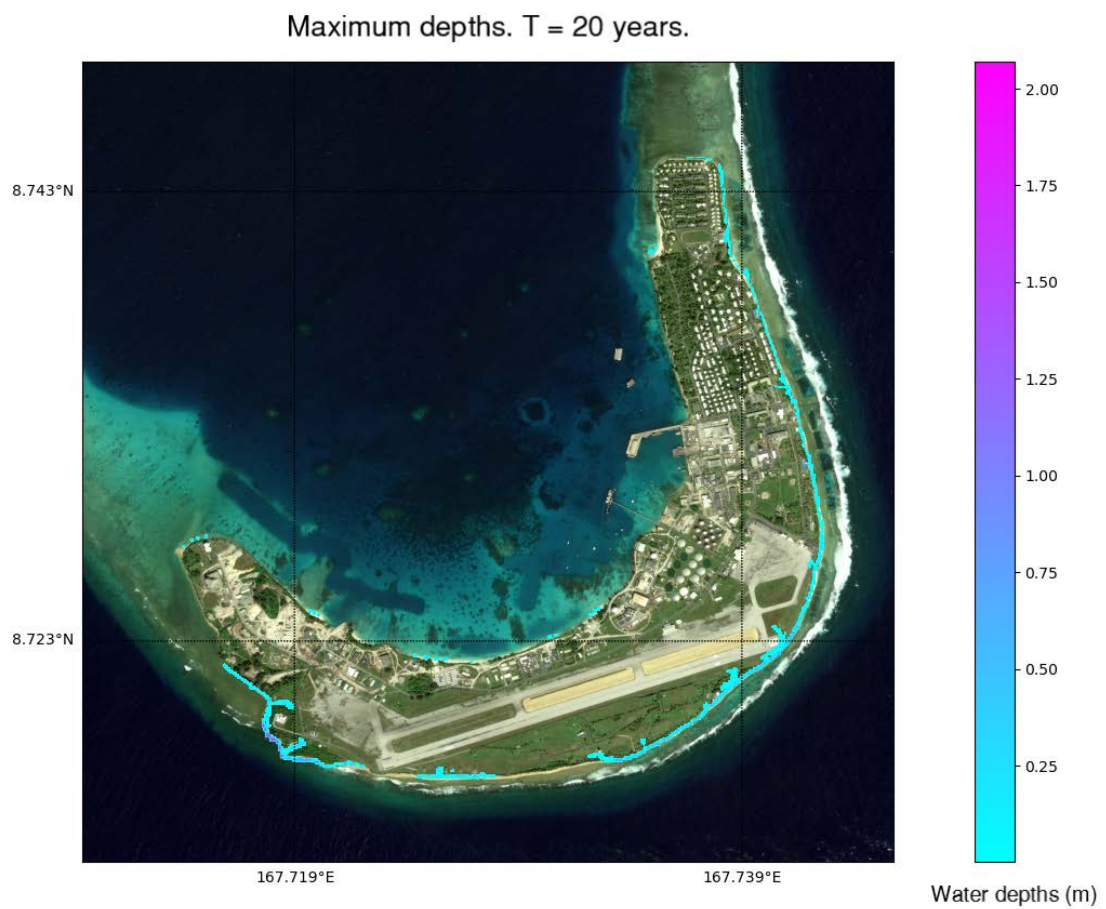


Figura A.10: Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno.

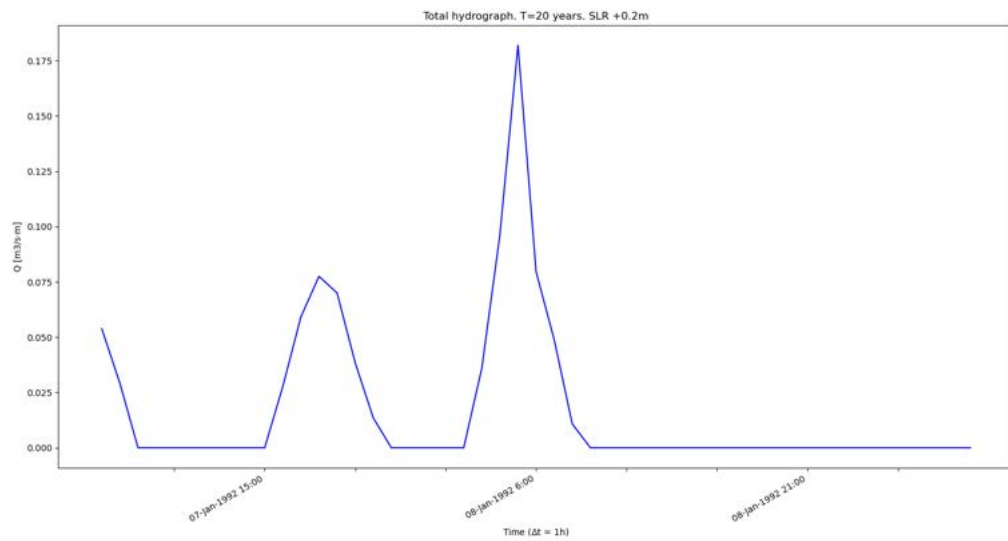
A.3.2. SLR +0.2 m

Figura A.11: Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.

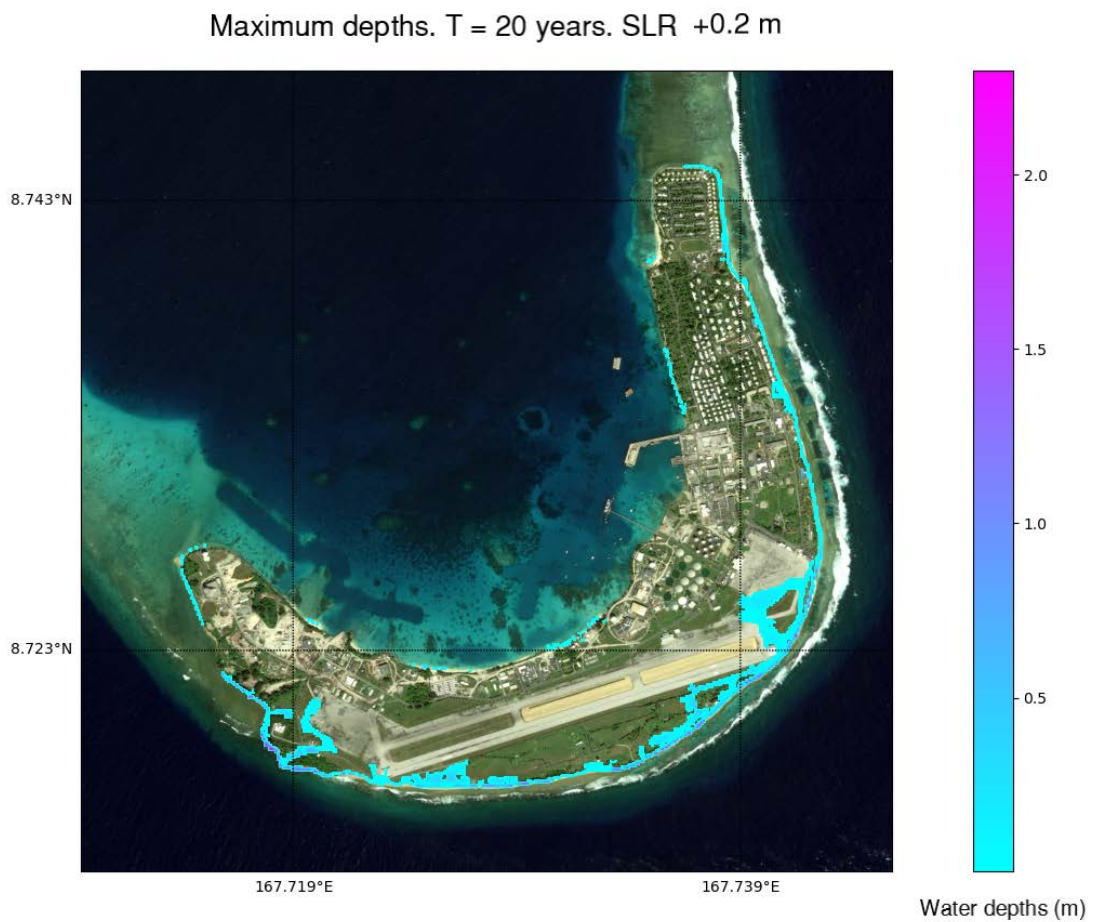


Figura A.12: Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.

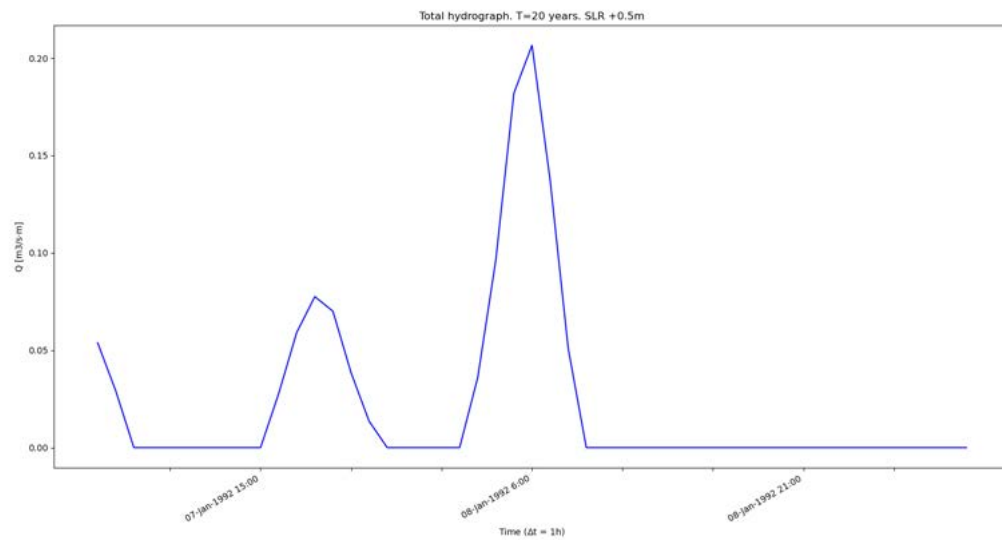
A.3.3. SLR +0.5 m

Figura A.13: Hidrograma agregado para el evento de 20 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.

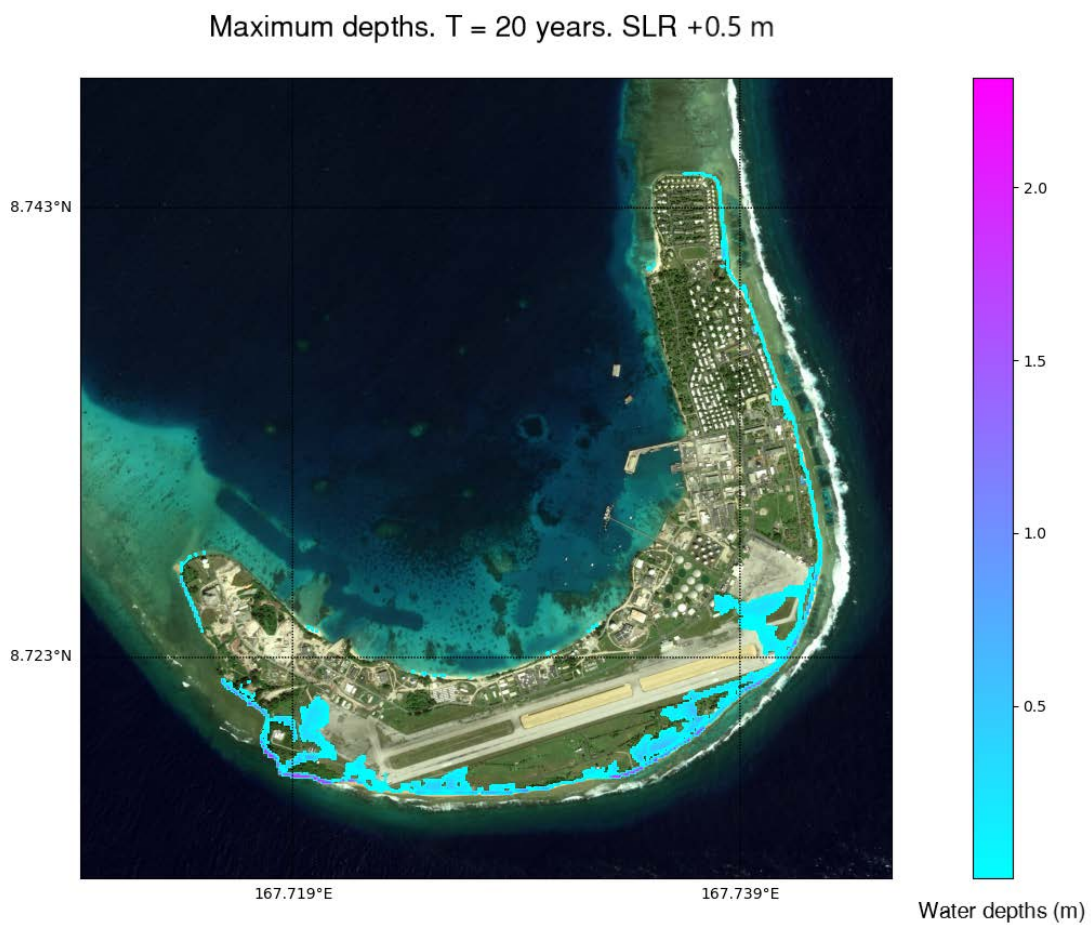


Figura A.14: Inundación obtenida para el evento de 20 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.

A.4. PERIODO DE RETORNO 40 AÑOS

A.4.1. Serie histórica

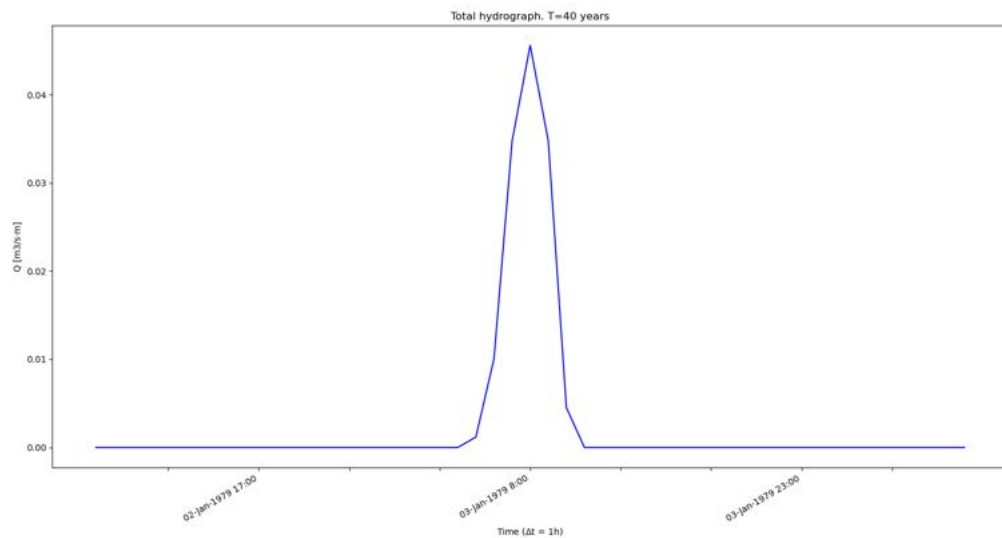


Figura A.15: Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno.

Maximum depths. T = 40 years.



Figura A.16: Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno.

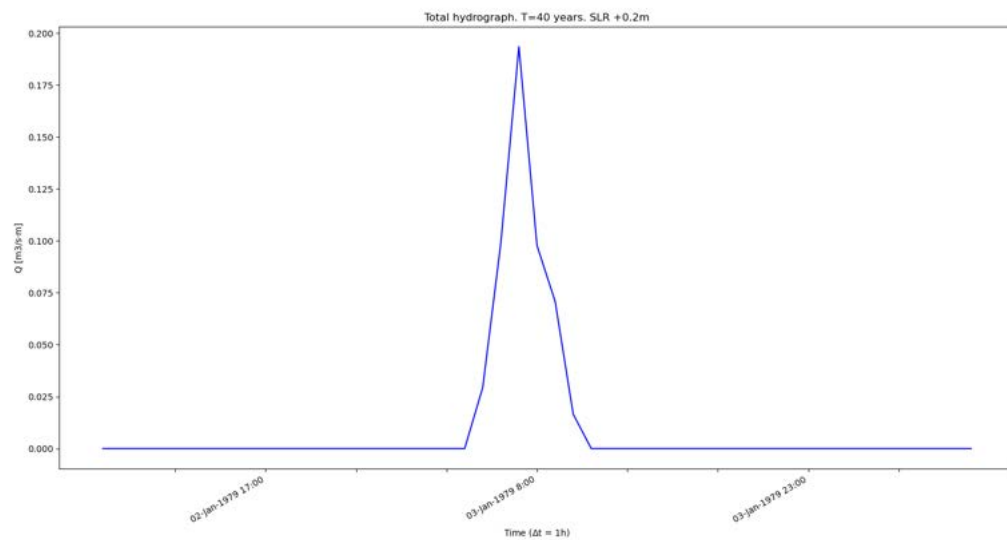
A.4.2. SLR +0.2 m

Figura A.17: Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno, con un SLR de 0.20 metros.

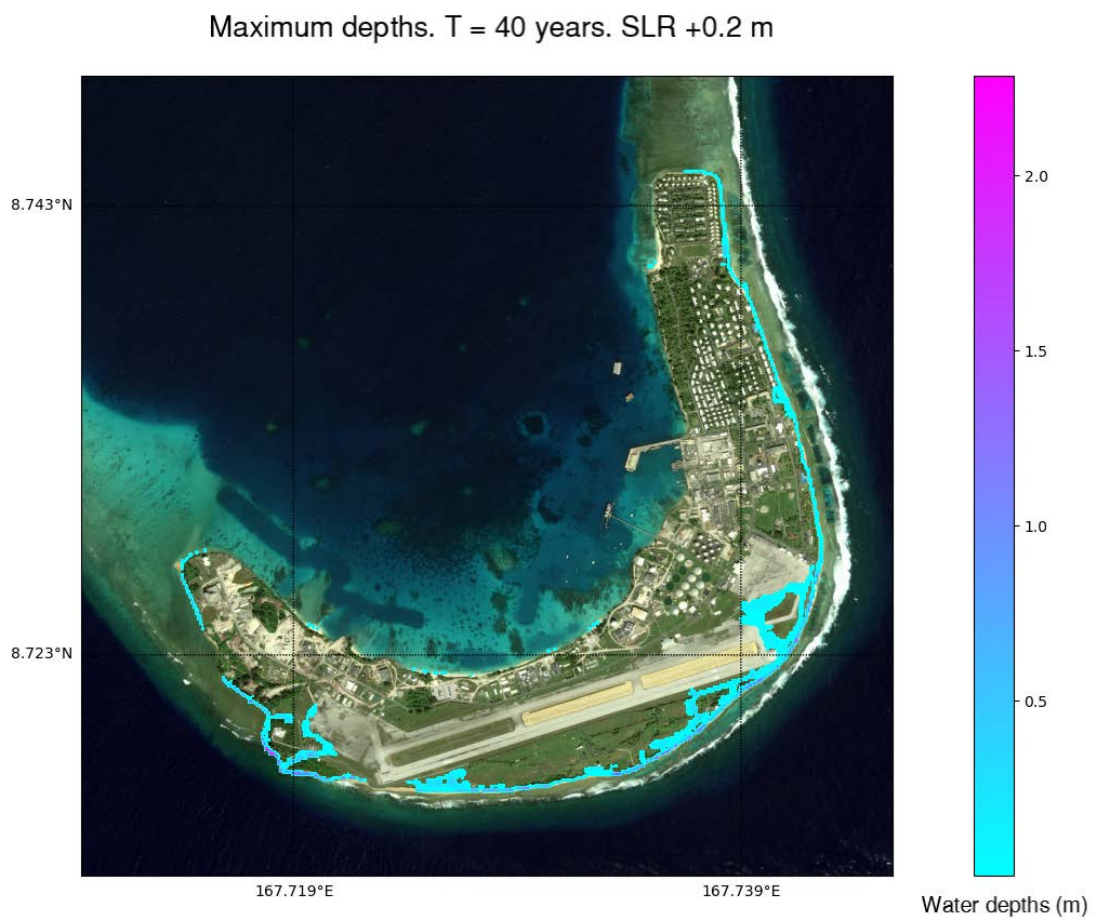


Figura A.18: Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.2 metros.

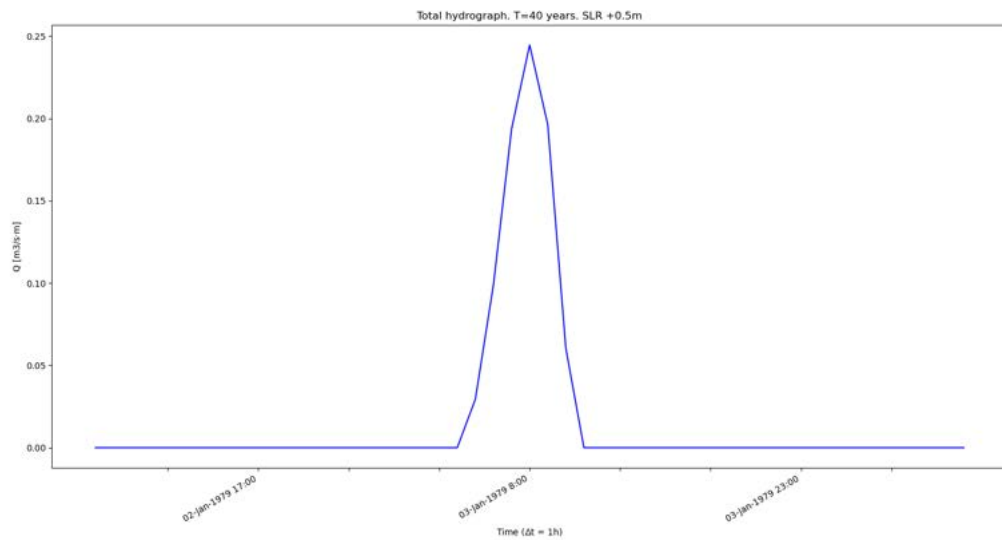
A.4.3. SLR +0.5 m

Figura A.19: Hidrograma agregado para el evento de 40 años de período de retorno, con un SLR de 0.50 metros.

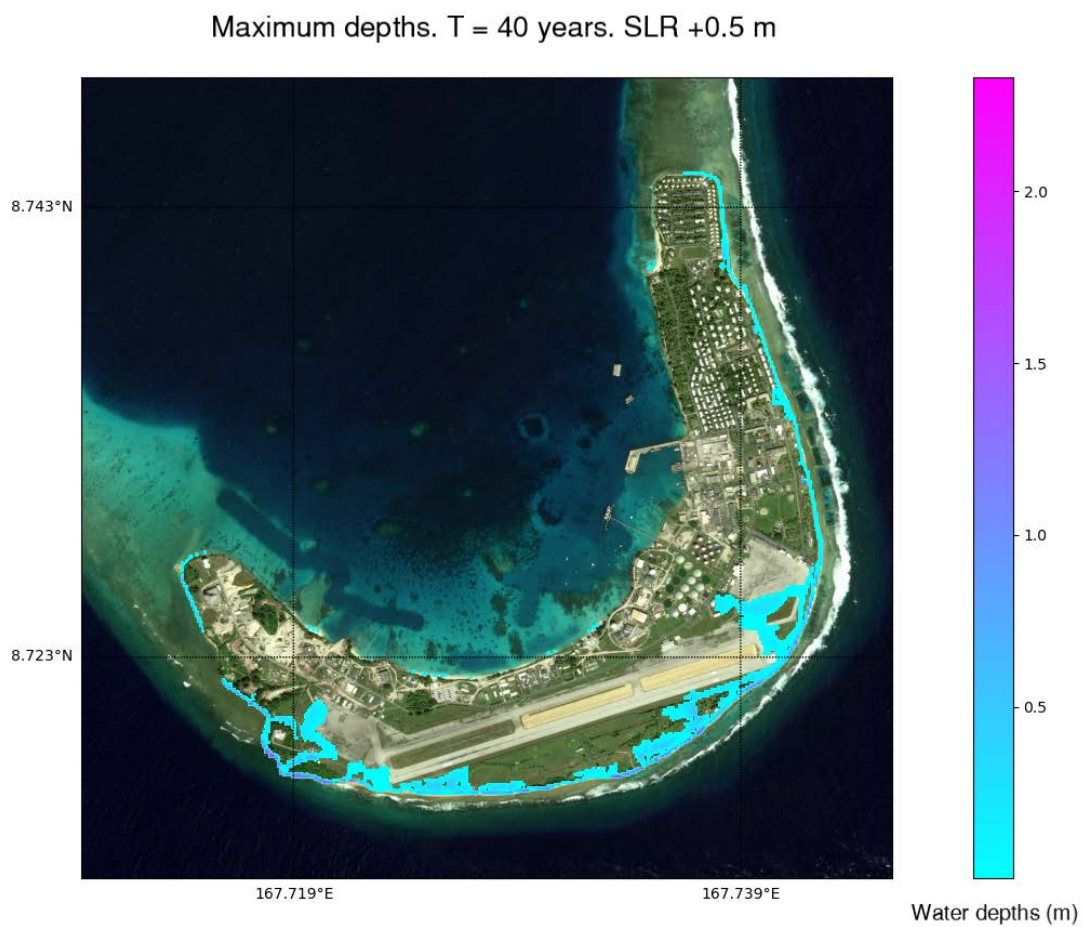


Figura A.20: Inundación obtenida para el evento de 40 años de período de retorno, con un aumento del nivel del mar de 0.5 metros.